COURS
D'ARTILLERIE.

7. Venene = Liege 7 de Junio de 1845.

IMPRIMERIE DE N. REDOUTÉ.

ÉCOLE D'APPLICATION DE L'ARTILLERIE ET DU GÉNIE.

COURS

D'ARTILLERIE.

PARTIE THÉORIQUE.

Par G. Piobert, Capitaine d'Artillerie.

Rédigée d'après les Cahiers et les Leçons du Professeur,

PAR

MM. DIDION ET DE SAULCY, Capitaines d'Artillerie.

LIÉGE,

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE DE A. LEROUX,

RUE DE LA RÉGENCE, 10.

1844.

ECOLE D'APPLICATION DE L'ARTILLERIE ET DU GÉNIE.

COURS D'ARTILLERIE.

Dans la première partie du cours d'artillerie, on s'est occupé du matériel que l'artillerie emploie, et on a examiné les conditions qu'il remplit, en n'entrant toutefois que dans des considérations générales sur les principes qui doivent servir de guide pour la construction de machines aussi importantes.

L'utilité de ces principes est incontestable ; car quoique nous possédions un système de canons et de mortiers, auxquels on n'a pas encore dû apporter de changemens importans depuis Gribeauval qui en est le créateur, et un matériel nouveau, dont l'expérience a déjà fait apprécier les propriétés, on peut néanmoins avoir besoin de construire d'autres bouches à feu, soit par suite de nouvelles combinaisons de guerre, soit pour des circonstances particulières. Or, ce n'est que par des tatonnemens successifs et après beaucoup de temps, qu'on est arrivé au système des canons actuels, et il a fallu à Gribeauval sa longue expérience et tout son génie pour arriver à un système qui ne donne lieu à aucun reproche grave.

Il n'en a pas toujours été ainsi; et en l'an XI, lorsqu'on a voulu apporter au matériel des changemens notables, les expériences que l'on fit à cette époque, pour constater les avantages de ces modifications, ont bientôt montré, combien il était difficile d'établir un nouveau système de matériel d'artillerie sans la connaissance de principes bien fondés. Il en a été de même dans beaucoup d'essais faits depuis cette époque.

Ce qui rend indispensable la connaissance des principes de construction, c'est que l'on n'a pas toujours le temps et les moyens de faire de nombreuses et longues expériences, lorsqu'il faut créer des bouches à feu pour certaines circonstances, ou pour obtenir

des effets extraordinaires. Celà est arrivé maintes fois; et l'on peut en citer plusieurs exemples récens. Ainsi au siége de Cadix, en 1810, on a eu besoin d'effets beaucoup plus puissans que ceux que pouvaient donner des mortiers de 1 calibre 1/2 de longueur et des obusiers de 3 calibres, comme les obusiers alors en usage pour atteindre cette ville des points où l'on pouvait se placer. C'est pour cette circonstance que furent créés des obusiers-canons de poids considérables, qui lançaient des obus de 11 pouces à plus de 6,000 mètres de distance.

L'utilité des principes de la construction du matériel d'artillerie ne se fait pas seulement sentir dans des circonstances extraordinaires, mais encore quand il s'agit d'obtenir des effets moyens, comme on l'a vu dans la construction des nouveaux obusiers, faits postérieurement aux infructueux essais de l'an XI, et dont le non-succès provient de l'absence de principes qui pussent servir de guides certains.

L'excellence d'un système d'artillerie dépend d'un grand nombre de conditions auxquelles il doit satisfaire, et les agens dont on fait usage sont si actifs, que des changemens, qui ne paraissent pas devoir amener de variations notables, produisent cependant des effets extrêmement différens.

Pour estimer les effets que se propose l'artillerie, il faut considérer le projectile destiné à atteindre de loin l'objet qu'on veut frapper; la poudre ou la matière qui doit communiquer au projectile la vitesse nécessaire; la bouche à feu qui doit contenir la poudre et diriger le projectile; enfin les machines qui sont destinées à transporter la bouche à feu et les munitions.

On s'occupera successivement de ces diverses parties.

DES PROJECTILES.

Un projectile est destiné à atteindre et frapper, traverser ou détruire un objet éloigné; les effets du projectile varient avec la forme et avec la matière dont il est composé.

Matière des Projectiles.

Le projectile, pour détruire l'objet contre lequel il est lancé, doit être doué d'une résistance suffisante; s'il est trop mou, relativement au corps qu'il frappe, il se déformera, s'étendra laté-

ralement et présentant une plus grande surface , il éprouvera une plus grande résistance , et par suite , il pénétrera moins avant que s'il avait conservé sa forme primitive. Une grande densité est aussi généralement très-favorable ; le projectile par là, en réunissant sous un moindre volume une masse plus considérable et éprouvant par suite moins de résistances , soit de la part de l'air , soit de la part du corps à détruire , pénétrera plus avant.

On a employé différentes matières pour faire les projectiles , savoir : la pierre , le plomb , le fer forgé , la fonte ; ces matières possèdent chacune des propriétés particulières qui doivent les faire préférer , suivant les circonstances dans lesquelles on les tire et suivant les objets contre lesquels on veut agir.

Les projectiles en pierre ont été en usage même avant l'invention de la poudre; depuis on en a souvent employé en masses énormes, sans qu'il aient eu une forme spéciale , en les lançant avec des espèces de fougasse. Ils produisaient de grands effets lorsqu'ils atteignaient le but ; ainsi au siége de Thorn en 1655 on lançait des meules de moulin du poids de 1,500 kil.; au passage des Dardanelles , les turcs lancèrent contre les vaisseaux ennemis des blocs de pierre du poids de 400 kil.; l'un d'eux tomba sur un vaisseau , y produisit de grands ravages et mit 100 hommes hors de combat ; l'amiral qui commandait, écrivit après la bataille , qu'un second projectile semblable aurait mis le bâtiment hors d'état de servir. A Constantinople on employa des boulets du poids de 600 kil. ; dans les Indes on en a trouvé de 21 pouces de diamètre pesant jusqu'à 550 kil. Les projectiles du temps de Charles-Quint , employés au siége de Metz et qu'on a retrouvés , avaient environ 0^m, 32 de diamètre. Ces derniers projectiles d'un grand diamètre qui n'avaient pas un poids considérable (environ 50 kil.) exigeaient des bouches à feu d'un grand calibre et dont l'épaisseur des parois devait croître avec le diamètre; elles étaient par suite , d'un poids considérable , ce qui les fit abandonner; ceux même qu'employa Charles-Quint, n'étaient que pour utiliser des bouches à feu existantes.

Pour faire brèche avec des boulets en pierre, on ne pouvait frapper la muraille en plein, sans quoi le projectile se serait brisé sans s'enfoncer beaucoup ; il fallait alors se contenter d'ébranler la maçonnerie et pour le faire avec avantage , commencer par le haut , là , où la maçonnerie n'était soutenue que dans la partie infé-

rieure. Les débris qui s'accumulaient au pied de la muraille en couvraient bientôt les parties encore debout, avant que la brêche ne fut terminée, et empêchaient de la rendre praticable.

Quand la bouche à feu était placée loin de la muraille, les projectiles, qui, à cause de leur peu de dureté, ne pouvaient recevoir une très-grande vitesse initiale, perdaient en outre beaucoup de vitesse avant d'arriver au but, par suite de leur faible densité; ils ne pouvaient ainsi produire que peu d'effet et encore atteignaient-ils rarement le point précis où ils pouvaient le produire; les projectiles des coups suivants se brisaient contre la maçonnerie ou allaient atteindre les maisons de la ville sans utilité pour l'attaquant. Aussi n'obtenait-on pas une brêche praticable avant 8 ou 10 jours et souvent même après un tir beaucoup plus prolongé.

Les boulets faits en grès et qui ont déjà une certaine dureté, auraient pourtant un effet avantageux contre certains matériaux; par exemple, contre le bois pour briser les affûts; dans le tir contre les vaisseaux, ils auraient même de l'avantage sur des boulets de fer, parce que sous un même poids, faisant un trou plus large en ébranlant les parties voisines, ils dégraderaient plus que le boulet en fer, qui ne fait qu'un trou facile à boucher avec une cheville; ces boulets pourraient être ainsi employés, mais avec une charge au-dessous du tiers du poids du boulet.

Du Plomb.

Le plomb possède l'une des propriétés essentielles des projectiles, une grande densité; mais il est trop mou pour être employé contre des obstacles résistans, puisqu'il s'applatit même contre l'eau.

Dans le principe de l'artillerie, on a employé des boulets en plomb, dont le poids allait jusqu'à 9 "; on les tirait dans des armes longues, dites canons à mains; on reconnut bientôt que contre des grands obstacles, comme des retranchemens en bois, ou contre des murailles, ils étaient trop mous et que contre des hommes ou des animaux ils avaient un effet plus grand qu'il n'était nécessaire.

Le maréchal de Saxe avait proposé de faire usage de balles de plomb du poids de 1 kil.; leur effet eut été plus que suffisant sur

des hommes; leur emploi n'a pas été adopté. Les plus grosses actuellement employées sont du poids de 1/8 de livre.

On voit que le plomb ne pouvant pas servir avec avantage contre des objets très-résistans, ne doit être employé que contre des hommes ou contre des animaux et qu'alors une petite masse est suffisante. Si on emploie quelquefois la balle du fusil de remparts contre des gabions, ce n'est pas pour détruire ceux-ci, mais seulement pour les traverser et atteindre ainsi les hommes qu'ils devaient abriter.

Fer Forgé.

On a aussi essayé dès le commencement de l'artillerie des projectiles en fer forgé. Ce métal jouit d'une grande dureté et d'une grande densité, mais la confection présentait beaucoup de difficultés pour les calibres un peu gros; on en fait encore usage, mais seulement sous les petits diamètres de 33mm à 55mm, pour en former des boîtes à balles; on a abandonné les balles du calibre de 25mm.

Cuivre.

On a essayé de fondre des projectiles en cuivre; le haut prix de cette matière y a bientôt fait renoncer.

Fer fondu.

L'introduction de la fonte de fer pour la confection des projectiles a fait faire à l'artillerie ses plus grands progrès; ce métal, d'une grande dureté, ne se déforme pas; il se brise quelquefois, mais alors il produit encore autant d'effet que s'il était entier. Ce métal est peu cher, facile à mouler et il peut ainsi recevoir à peu de frais des formes très-précises.

Densité des projectiles.

La résistance que l'air oppose au mouvement d'un boulet, augmentant à-peu-près comme la superficie de son grand cercle, il est très-avantageux, pour que les projectiles conservent une grande partie de leur effet à une distance un peu grande, que leur masse soit comprise sous un petit volume; plus la densité du projectile

sera grande, moins celui-ci éprouvera de résistance de la part de l'air. Ainsi de deux projectiles de même poids, l'un en pierre par exemple, et l'autre en fonte, dont la densité est environ 2 fois 1/2 celle de la première, et qui devront atteindre un objet éloigné avec une même vitesse, le premier devra être lancé avec une vitesse bien plus grande; ou s'ils sont lancés avec des vitesses égales, le dernier produira un effet plus considérable.

C'était pour produire aux grandes distances des effets encore plus considérables qu'avec des boulets de fonte, qu'on a proposé récemment d'employer le plomb dont la densité est environ 1 fois 1/2 celle de la fonte, en boulets du calibre de 4 qui auraient pesé 6 ᵗᵗ. et qui devaient produire autant d'effet que des boulets de 12.

La densite des boulets de pierre était égale à celle des matières qu'on employait; elle variait de 2,50 à 2,70, celle de l'eau étant 1. Celle des projectiles en métal, n'est pas la même que celle qui est indiquée dans les tables ordinaires de densités; cela tient à ce que ces densités sont prises sous de petites masses, exemptes de soufflures et d'autres vides intérieurs, et qu'il n'en est pas ainsi des projectiles coulés sous des formes sphériques; ces projectiles se refroidissent par la partie extérieure et le retrait se fait en laissant nécessairement un vide intérieur; la densité de ces projectiles doit donc être moindre que celle qui est indiquée pour les métaux.

Celle des projectiles coulés en France dans les différentes forges depuis 10 ans, prise en comparant leur poids au volume donné par le diamètre moyen entre la grande et la petite lunette est de 7,052 et c'est ce nombre qu'il faut choisir pour calculer les dimensions des boulets; celle des projectiles anglais prise de la même manière est de 7,228; cette différence tient sans doute à la nature de la fonte.

La densité des projectiles en plomb diffère aussi, et pour les mêmes raisons de la densité ordinairement donnée pour le plomb fondu et qui est de 11,352; celle des balles de fusil n'est que de 11,188 prise dans l'eau; cette différence tient à un vide intérieur, qui existe dans toutes les balles, parce que le refroidissement et la solidification s'opérant d'abord à la surface extérieure et pénétrant jusqu'au milieu du jet avant que l'intérieur ne soit solidifié, le retrait s'opère aux dépens de cette partie et y laisse un vide. Pour

l'éviter, il suffit de maintenir le jet à l'état liquide plus long-temps que l'intérieur de la balle, en continuant à y couler du plomb ; les balles ont alors la densité ordinaire 11,352. Le plomb de certains objets du commerce a une densité supérieure; cette augmentation provient de l'écrouissage; on a fabriqué des balles par compression pour éviter ce vide intérieur qui, n'étant pas au centre de figure, déplace le centre de gravité et peut ainsi produire des déviations. Cependant l'expérience a montré que l'on n'obtenait pas sensiblement plus de justesse, ni plus de portée.

La densité du fer forgé pour les balles des boîtes à balles et calculée comme celle des boulets, est de 7,60.

Forme des projectiles.

La recherche de la forme la plus avantageuse à donner aux projectiles de l'artillerie n'est pas aussi simple qu'il le paraît d'abord, et la solution de cette question dépend à la fois de considérations physiques et de conditions à remplir pour le service; quoique le problème paraisse résolu en faveur de la forme sphérique, généralement en usage, il est cependant nécessaire de connaître les raisons qui l'ont fait adopter.

La résistance de l'air pendant le trajet du projectile diminuant considérablement l'effet dont celui-ci est susceptible, c'est l'influence de la forme sous ce rapport que nous allons d'abord considérer. Supposons une surface plane se mouvant dans l'atmosphère et restant perpendiculaire à la direction du mouvement; si l'air n'était que déplacé, la résistance croîtrait comme l'étendue de la surface et comme le chemin parcouru pendant un même temps, c'est-à-dire, comme la vitesse; mais il n'en est pas ainsi, parce que l'air est élastique. Si l'élasticité de l'air était parfaite et si les molécules étaient indépendantes les unes des autres, la surface imprimerait à ces molécules une vitesse égale à celle qu'elle même possède et la résistance serait proportionnelle au carré de la vitesse. Mais cette loi, n'est pas entièrement exacte, et l'expérience montre que la résistance de l'air contre les projectiles, croît dans un plus grand rapport que le carré de la vitesse.

On a appliqué la même théorie à la résistance que doit offrir un plan incliné à la direction du mouvement, et on a trouvé que la

résistance doit être proportionnelle au carré du sinus de l'inclination du plan avec la direction du mouvement. Cette loi est exacte aux deux limites extrêmes, c'est-à-dire, pour l'angle 0° et pour celui de 90°, la résistance et le sinus sont inégaux à l'unité dans le premier cas, et à zéro dans le second; mais cela n'a plus lieu entre ces deux limites; en effet, d'après les expériences de Hutton sur des plans inclinés et pour des vitesses allant jusqu'à 20 pieds par seconde, la résistance est à peu près porportionnelle au sinus ou à la projection depuis 90° jusqu'à 60°, mais en-delà la résistance ne suit plus la même loi car :

Pour l'angle de 20° elle n'est que 1/2 de la résistance théorique
———id.——— 14° ——id.—— 1/4 ————id.——
———id.——— 9° 1/2—-id.—— 1/3 ————id.——
———id.——— 4°———id.—— 1/5 ————id.——
———id.——— 2°———id.—— 1/6 ————id.——

Dans les considérations théoriques précédentes, on ne tient pas compte du frottement de l'air sur les faces du corps ni de l'influence que la courbure et l'étendue de la surface antérieure et postérieure exercent sur l'air, en augmentant sa densité et en favorisant plus ou moins son passage en arrière.

L'air étant très-mobile, lorsqu'un projectile s'y meut, il comprime les couches antérieures jusqu'à une certaine distance, augmente leur pression et leur communique une certaine vitesse; ces couches se rangent ensuite latéralement, puis se précipitent derrière le corps avec une vitesse accélérée; mais elles ne le rencontrent qu'avec une vitesse d'autant moindre et elles exercent sur lui une pression d'autant plus faible que la vitesse du corps est plus grande; on a même pensé que si cette vitesse était suffisante, il pourrait arriver, que les couches lancées excentriquement ne reviendraient derrière le corps qu'après que les parties postérieures seraient déjà assez avancées pour n'être plus atteintes; et qu'alors, le vide pourrait se former et que la pression de l'air sur la face postérieure pourrait diminuer jusqu'à être nulle dans certaines parties. En tous cas, la résistance que le corps éprouve dans son mouvement peut augmenter par l'influence de la forme postérieure.

Les molécules revenant vers la trajectoire du projectile avec une vitesse accélérée, et comme attirée vers le centre, elles décrivent

par rapport à la direction de celui-ci une sorte de trajectoire. et comme elles affluent de toute part, elles doivent, en se rencontrant avant de se mêler, former des tourbillons. Ces tourbillons ne peuvent se mouvoir avec la même vitesse que le corps lui-même; ils laissent un espace qui fait infléchir les trajectoires suivantes, de façon que la convexité soit vers le centre et que de nouveaux tourbillons se forment ensuite dans un sens opposé au 1er.; après quoi il s'en formera de nouveau dans le premier sens et ainsi de suite, alternativement et pour la même raison. On peut facilement apercevoir des phénomènes semblables à ceux-ci, en faisant mouvoir un corps à la surface de l'eau; on verra, par les ondes qui se forment en avant, sur les côtés, et par les tourbillons qui se forment par derrière, ce qui doit se passer dans l'air; on peut reconnaître par là, comment la forme allongée et arrondie de la surface antérieure, en facilitant le passage de l'air et en diminuant la densité des couches, peut diminuer la résistance; ce qu'il en est de même de la forme allongée postérieurement pour augmenter la pression de l'arrière à l avant des couches déplacées qui se précipitent dans l'espace que laisse le corps. F. 2a F. 3a

Ces phénomènes sont extrêmement compliqués et n'ont pas permis jusqu'à présent d'obtenir la résistance des corps en mouvement dans l'air autrement que par des expériences directes; nous allons nous occuper des résultats qu'elles ont fournis.

Expériences sur la résistance de l'air.

Les expériences dont nous allons parler ont été faites par Borda et par Hutton; Borda (*) a opéré à des vitesses de 3 à 4 pieds jusqu'à 25 pieds; les arêtes étaient perpendiculaires à la direction du mouvement; les profils de ces prismes étaient 1° un triangle équilatéral la base en avant; 2° le même triangle, le sommet en avant; 3° les deux côtés de ce triangle remplacés par une demi ellipse; 4° ces deux côtés remplacés par deux arcs de cercles décrits du sommet opposé et formant ogive. F. 4.

On a obtenu les résultats, qu'on a comparés dans le tableau suivant aux résultats que donnerait la théorie précédente.

(*) Histoire de l'Académie des Sciences, année 1763.

FORME DE LA BASE DES PRISMES.	RÉSISTANCE EXPÉRIMENTALE.	RÉSISTANCE THÉORIQUE.
1° Triangle, base en avant	100	100
2° Triangle, sommet en avant	52	25
3° Demi ellipse	45	50
4° Ogive	39	41

On voit par là que pour la deuxième figure, la résistance théorique n'est pas moitié de celle de l'expérience, tandis que pour les 3ᵉ et 4ᵉ elle est plus grande; on ne peut donc nullement se fier à cette théorie. Des quatre formes essayées la 4ᵉ est la plus favorable au mouvement; on explique facilement l'avantage des formes arrondies, sur celles dont les faces sont en ligne droite, parce que, dans celles-ci, les molécules avant de quitter le corps à l'endroit du plus grand renflement reçoivent encore une vitesse dans une direction excentrique, tandis que lorsque le dernier élément est parallèle à cette direction, il n'y a plus de vitesse excentrique imprimée, et l'air se précipite derrière le corps avec plus de facilité; l'on voit immédiatement qu'en prolongeant cette courbure en arrière on aurait facilité ce mouvement de l'air et par conséquent diminué la résistance.

Les expériences de Hutton (*) ont été faites comparativement entre des surfaces de révolution dont l'axe était dans la direction du mouvement. Le diamètre des bases était pour toutes les surfaces (en mesure anglaise) de 6 po,376 (0m,162) et la vitesse de 3 à 20 pieds par seconde.

Le tableau suivant contient les résultats comparés des diverses expériences pour des vitesses de 10 pieds et la résistance qui serait déduite des formules théoriques précédentes.

(*) Nouvelles expériences d'artillerie, traduites par Terquem.

DÉSIGNATION DES SURFACES.	RÉSISTANCE EXPÉRIMENTALE.	RÉSISTANCE THÉORIQUE.	
			F. 7.
No 1. Hémisphère (convexité en avant)	119	1	
No 2. Sphère entière	124	1	
No 3. Cône, l'angle au sommet égal à 25°, 42'	126	0,40	F. 10.
No 4. Disque	285	2	F. 8
No 5. Hémisphère partie plane en avant	288	2	F. 9
No 6. Cône, base en avant	291	2	

Les surfaces No 2 et 3 donnent peu de différence, quoi que la théorie en indique une très-grande; et dans les N. 4 et 5, qui donnent à peu-près les mêmes résultats, l'avantage de la forme antérieure du No. 5 est compensé par le peu d'épaisseur du No. 4. La théorie pour ces trois derniers, indique une résistance double des premiers tandis qu'effectivement, elle est environ deux fois et demi la première.

On a cherché quelle est la forme sous laquelle un corps en mouvement présentait moins de résistance à l'air, et on trouvé que sa longueur devait être 5 fois sa plus grande largeur et, que la plus grande section était située au 2/5 de la partie antérieure. F. 11.

Dans toutes les expériences précédentes, les corps étaient maintenus constamment dans la même direction; mais il ne peut en être ainsi avec les projectiles de l'Artillerie qui prennent dans leur trajet, des positions différentes, dont il résulterait des résistances plus grandes que celles sur lesquelles on compterait.

La sphère seule jouit de la propriété d'offrir toujours une même surface, et par conséquent la même résistance au choc de l'air; elle contient aussi un même volume sous la moindre surface et elle offrira par là, une résistance moindre qu'une autre surface n'en offrirait dans les différentes positions qu'elles prendront successivement.

Les projectiles ordinaires, par la manière dont ils sont lancés,

ayant toujours un certain mouvement de rotation, et frappant l'air dans ce mouvement, toute autre forme que la forme sphérique produirait de très-grandes déviations; car les résistances partielles n'étant pas distribuées symétriquement autour de la direction du mouvement, n'auraient pas une résultante unique suivant cette ligne. Il en serait de même de la forme sphérique si le centre de gravité ne se confondait pas avec le centre de figure; ces déviations ont lieu même pour une sphère parfaite douée d'un mouvement de rotation; l'expérience le montre et il est aisé de s'en rendre compte. En effet : si la sphère, outre son mouvement de rotation en avant, a aussi un mouvement de rotation, que nous supposerons pour plus de facilité avoir lieu autour d'un axe vertical, les portions situées à droite marchant en avant, dans le même sens que le centre de gravité, le frottement de cette portion du corps contre les couches d'air qui doivent passer de l'avant à l'arrière, rendra le passage plus difficile que si le mouvement n'avait pas lieu; il augmentera par conséquent la densité et la pression latérale des couches de ce côté; le contraire aura lieu du côté opposé, où le mouvement de rotation du projectile facilitera l'écoulement; par cette double raison la somme des pressions latérales de la droite l'emportera sur celle de la gauche et le projectile sera par conséquent continuellement pressé vers la gauche et déviera de ce dernier côté.

D'une autre part, la pression de l'air sur la partie antérieure, produira un frottement qui agira de gauche à droite et fera dévier le projectile dans ce sens. Il résulte de là deux effets différents et dont l'intensité, respective variant avec la vitesse, produit une déviation irrégulière, d'abord dans un sens, puis dans l'autre.

La forme sphérique présente aussi de grands avantages pour le trajet du projectile dans la bouche à feu; celui-ci peut être présenté et entrer également dans tous les sens, il roule au lieu de glisser et sous ce rapport, il dégrade moins les bouches à feu; à la vérité, il ne pose que par un point, mais il en serait de même pour toute forme arrondie, et pour une forme cylindrique il n'y aurait qu'une arête de contact. Dans le tir, le boulet sphérique ne peut pas s'arc-bouter, ce qui arriverait avec une forme allongée, comme on l'a vu dans des expériences qu'on a faites en 1852 à l'École de Metz sur des projectiles oblongs lancés par des obusiers; ces projectiles,

qu'on voulait faire frapper le but constamment par la partie antérieure, avaient un vide à la partie postérieure et devaient faire explosion au moment du choc par l'effet d'une amorce à percussion ; l'obus allongé produisit de grandes dégradations et au bout de peu de coups un fort égueulement à la bouche. Le projectile, du reste, fut trouvé dans la butte dans diverses positions différentes de celles qu'il avait dans la bouche à feu, parce qu'il avait tourné dans son trajet ; par conséquent il ne remplissait pas l'objet qu'on s'était proposé.

A tous les avantages de la forme sphérique, se joint encore la facilité de la confection des moules et de la vérification des projectiles lors des réceptions. Si la forme sphérique quoique difficile à donner à la pierre avait déjà été adoptée pour des projectiles de cette matière, à plus forte raison devait-elle l'être pour les projectiles en matière coulée.

EFFETS DES PROJECTILES.

Lorsqu'un projectile a atteint le but contre lequel on l'a lancé, son effet varie suivant sa dureté, sa masse et la vitesse qu'il possède encore à ce moment ; on doit donc chercher à lui donner ces propriétés à un degré qui convient à l'effet qu'on se propose.

Les projectiles peuvent avoir différents effets à produire : soit à traverser un obstacle, ou à le renverser, soit à briser ou diviser un corps ou à se diviser lui-même pour frapper sur une plus grande étendue, soit encore à porter des matières propres à incendier ou à éclairer des objets éloignés, et dont on ne peut s'approcher.

La dureté d'un projectile, favorise toujours sa pénétration dans un corps ; elle doit augmenter avec celle de l'obstacle ; si elle n'est pas suffisamment grande relativement à cette dernière, au moment du choc, le projectile se déforme, il présente une plus grande surface perpendiculairement à la direction ; il éprouve alors plus de résistance et pénètre moins avant.

Cet effet est sensible, même contre des corps très-divisibles comme l'eau et c'est ce que montrent les expériences suivantes faites sur la pénétration des balles de fusil dans l'eau à différentes distances et par suite avec des vitesses d'arrivée différentes.

Tableau de la pénétration dans l'eau, de balles de fusil d'infanterie de 19 à la livre.

VITESSE DE LA BALLE A L'ARRIVÉE AU BUT.	PÉNÉTRATION DANS L'EAU.	OBSERVATIONS.
Mètres par seconde	Enfoncement croissant jusqu'à	
300	3 m.	
350	3	La balle est applatie
400	1,60	id.
450	1,35	La balle est applatie jusqu'au centre
500 à 550	0,75	La balle se brise

On voit que lorsque la balle ne se déforme pas, l'enfoncement augmente jusqu'à la vitesse de 300m à partir de laquelle cet enfoncement décroit parce que la balle se déforme de plus en plus et finit par ne devenir, pour une vitesse de 500m à 550m que un quart de l'enfoncement maximum.

Quand le projectile est d'une matière assez dure pour qu'il ne se déforme pas, l'enfoncement va toujours croissant avec la vitesse; cet enfoncement est ainsi proportionnel à son rayon et à sa densité et dépend plus de la vitesse du projectile que de sa masse.

Lorsque la vitesse du projectile est très-grande, la durée d'une certaine pénétration est tellement courte que les parties du corps qui se trouvent sur son passage sont détruites, avant qu'elles aient eu le temps de réagir sur les parties voisines et de les entrainer, et le corps est traversé sans être sensiblement ébranlé.

Ainsi une porte en planches est traversée par une balle de fusil sans être entrainée quoique celle-ci puisse se mouvoir avec facilité.

Quand un projectile frappe avec vitesse contre du bois, il pénètre en ne laissant qu'un trou; lancé avec une moindre vitesse, le projectile ébranle la masse et la brise. Si le projectile est destiné à ébranler ou à renverser un obstacle, il devra ne posséder qu'une faible vitesse; il sera au contraire avantageux de lui donner une masse et un diamètre considérable.

Division du projectile.

Si le projectile possède une quantité d'action plus que suffisante pour détruire l'objet qu'il frappe, il y a alors avantage à ce que ce projectile se divise lui-même, pour embrasser une plus grande étendue en frappant un plus grand nombre d'objets et avoir par conséquent plus d'efficacité ; chaque projectile partiel ayant alors la même vitesse que le projectile entier et une portion seulement de sa masse.

La disjonction peut être préparée à l'avance, comme celà a lieu dans les boîtes à balles; chaque projectile partiel a pu recevoir une forme convenable à son trajet dans l'air ; ou bien la disjonction peut n'avoir lieu qu'à l'arrivée au but, comme avec les obus qui se brisent par l'explosion d'une charge intérieure et dont les éclats ne reçoivent de vitesse que de cette explosion même. Enfin la disjonction des projectiles peut présenter l'un et l'autre de ces effets, comme dans les obus à balles dits à la Straquenelle; ces obus sont remplis de balles de plomb et contiennent une charge de poudre qui doit faire explosion avant l'arrivée au but; ils lancent des éclats comme les obus ; et les balles en s'écartant un peu, en embrassant une certaine étendue, sont comme lancées par l'obus avec la vitesse dont il est animé au moment de l'explosion.

Les boulets incendiaires destinés à incendier les objets dans lesquels ils pénètrent, sont lancés comme les autres projectiles. Dans quelques pays, en Prusse, en Russie ce sont des obus à 4 ou 5 œils, suivant leur calibre et qui sont remplis de matières incendiaires.

Les balles à feu sont les projectiles destinés à éclairer; on les lance comme des projectiles creux.

M. Delvigne, officier d'infanterie et inventeur du procédé de chargement à balles applaties, a proposé d'employer pour projectile incendiaire, des balles de fusil de rempart creuses, remplies de poudre et fermées par une capsule ou amorce fulminante qui s'enflamme quand la balle frappe. En la lancant contre des caissons ennemis, elle devait, en les traversant mettre le feu aux munitions.

Il y a encore quelques autres projectiles d'un emploi tout spécial

Les boulets ramés sont formés de deux projectiles demi sphéri-

ques ou de deux boulets applatis réunis par une barre ou une chaine ; tirés avec un canon, ils prennent un mouvement de rotation et font étendre la chaine; leur portée est les 2/3 de la portée ordinaire. Lancés contre les mats et les cordages des vaisseaux ennemis, ils ont plus de chances de les atteindre et lorsqu'ils les atteignent, ils les déchirent sur une grande étendue et y font de grands ravages.

F. 14. y 15. Un projectile de ce genre, mais qui n'est pas adopté en France, est composé de cinq barres de fer et réunies à un seul gros anneau par l'une de leurs extrémités terminée en piton. On les reploie de manière à en faire un seul faisceau, pour les introduire dans un canon et les projeter à l'aide d'un sabot. Dans le trajet de ce projectile, les barres s'écartent, forment une étoile et produisent de grands ravages dans les voilures et les agrès qu'elles atteignent.

On emploie encore des projectiles pour lancer un cordage à un F. 16. vaisseau en danger, dans un mauvais temps. Les Anglais ont réussi à en rendre l'emploi facile, en employant un boulet percé d'un trou dans lequel est vissée une barre de fer de $0^m,75$ à $0^m,80$ de longueur ; cette barre est terminée à l'extrémité opposée par un anneau dans lequel passe une lanière de cuir tressée et fixée au cordage qu'on veut lancer.

La barre étant mise en avant, doit se retourner à la sortie de la bouche à feu, pendant ce temps le cordage prend progressivement la vitesse de l'obus et peut résister à la tension encore très-considérable qu'il éprouve dans les premiers moments. Cela n'arriverait pas s'il était attaché immédiatement au boulet; le cordage se romprait par la résitances qu'il opposerait au mouvement.

Les Anglais ont de ces projectiles dans les magasins tout disposés et prêts à être lancés.

On se sert aussi de projectiles creux pour lancer des ordres et des avis écrits qu'on y renferme. Ce moyen a été rarement employé, il pourrait cependant rendre des services importans dans une ville assiégée.

Effets des projectiles sur divers matériaux, et sur les êtres animés.

Examinons maintenant les effets des projectiles pleins et creux sur les matériaux de différentes natures et sur les corps animés.

Les effets d'un projectile varient suivant la dureté des matières contre lesquelles il est lancé, la résistance que le projectile éprouve augmente avec sa vitesse propre et la dureté du corps choqué ; si c'est un corps mou, le projectile n'éprouve pas une résistance assez grande pour être déformé, il brise ou il écarte les parties du corps qu'il rencontre, pénètre ainsi jusqu'à ce que la somme des résistances successives ait épuisé la force vive dont il était animé et s'arrête sans être brisé ni déformé à une certaine profondeur ; cette profondeur dépend de la masse et de la vitesse du projectile et de la résistance à la pénétration du corps choqué. Dans d'autres cas, la dureté du corps choqué et la vitesse du projectile pourront être assez grandes, pour que la résistance que ce dernier éprouve soit telle qu'il se brise.

Cet effet ne dépend pas seulement de la dureté du corps choqué mais encore de la dureté du projectile ; aussi des corps très durs, comme le fer, se dépriment sous l'action d'un projectile lancé avec une faible vitesse, sans que le projectile ne soit modifié en apparence ; tandis que dans le plomb le projectile est brisé quand la vitesse est grande.

Examinons les effets du choc d'un projectile en fonte contre les matériaux dont on fait usage à la guerre, chacun en particulier.

Effet sur la fonte.

Lorsqu'un boulet animé d'une grande vitesse arrive contre un bloc de fonte, il se comprime, s'applatit de manière à s'appliquer contre la face touchée, et y produit une cavité arrondie dont la flèche croît avec la vitesse du projectile au moment du choc. Mais il n'y a que la partie formée des molécules du boulet près du point de contact qui s'arrête immédiatement. Cette partie a la forme d'un cône dont la portion applatie est la base et dont l'axe est sur la direction du mouvement ; les autres parties du projectile en vertu de l'inertie, tendent à continuer leur mouvement et si leur vitesse est assez grande pour vaincre leur cohésion, elles glissent sur les faces de la partie conique et s'arrêtent quand elles glissent sur la face du bloc de fonte. Cette rencontre ayant lieu obliquement, les premières portions de la couche qui glisse sont d'abord arrêtées ; les autres tendent à se mouvoir et se détachent en aban-

donnant une couche d'une certaine épaisseur; des couches semblables se forment de proche en proche ; les premières ne sont que faiblement déplacées et continuent à former un seul corps, les autres ont subi un mouvement qui a tout à fait détruit la cohésion ; leur disjonction est incomplète.

Ces couches en descendant, s'approchent de la base de la pyramide et sont forcées de s'étendre; dès que cette extension dépasse le degré d'élasticité de la fonte elles se séparent.

Cette séparation a généralement lieu suivant cinq plans méridiens, de sorte que le noyau dont se détachent les couches qui ont glissé les unes sur les autres a une forme de pyramide à cinq pans.

La pyramide est d'autant plus applatie et ses angles au sommet d'autant plus grands que la vitesse du choc est plus grande ; si la vitesse du choc n'est pas suffisamment grande, on n'observe pas de couches successives disjointes et le noyau a la forme d'un cône; les cinq fentes méridiennes, suivant lesquelles se serait brisé le projectile sont formées, mais les parties ne sont pas disjointes. Quand la vitesse est grande le tiraillement qui a lieu dans la fonte en change l'apparence ; elle devient fibreuse.

Des phénomènes analogues à ceux que nous venons de décrire se présentent dans le bloc de fonte choqué, il présente aussi un noyau de forme conique d'autant plus aigu que la vitesse est plus petite ; les couches latérales qui ont glissé sur le noyau du projectile rencontrent la surface du bloc, écartent du premier point de contact les parties qui l'environnent et forment ainsi un noyau et plusieurs cônes successifs ; mais les faces, à mesure qu'elles sont formées plus loin du centre, s'approchent de plus en plus d'être perpendiculaires à la surface ; le noyau formé est d'autant plus obtus que la vitesse du projectile est plus grande, il pénètre dans le bloc, y fait coin et le fend dans une très-grande longueur. C'est ainsi que dans les expériences qui ont eu lieu à Metz en 1854, un bloc de fonte de $1^m,00$ de longueur et 0^m30 d'épaisseur et du poids de 2,100 kilog. a été fendu dans toute sa longueur par des boulets de 24 lancés avec la charge faible de 1/24 du poids du boulet.

Si le corps choqué est d'un poids comparable à celui du projectile, il prend une certaine vitesse pendant le choc; l'effet alors n'est plus relatif à une vitesse moindre que celle du corps choquant. Si par exemple, le premier corps est un boulet de même calibre que

le second, la vitesse résultante sera moitié de la vitesse primitive, les vitesses relatives seront diminuées et il en sera de même des effets du choc; dans ce cas le noyau du corps choqué ne se détache pas complètement; les parties avoisinantes se disjoignent en premier lieu et le sommet du noyau formé reste noyé dans la portion intacte du boulet choqué; si le corps choqué est un projectile creux, il peut n'y avoir qu'un petit morceau détaché, d'une manière très nette et rejeté dans l'intérieur; mais alors le noyau ne se prolonge pas jusqu'à la surface intérieure de la paroi, il en détache une portion évasée vers la partie intérieure de l'obus, tout comme dans le cas précédent, où cette portion se prolongeait jusqu'à l'hémisphère opposé du boulet; quelquefois il n'y a qu'un très-petit trou formé; toute la portion détachée va en s'évasant et reste dans le projectile.

Fer forgé.

Les phénomènes dûs au choc des boulets contre le fer forgé sont à peu près les mêmes dans le choc contre la fonte; le boulet présente de même dans son choc, un noyau pyramidal et des couches qui glissent les unes sur les autres. Quant au corps choqué à cause de sa malléabilité plus grande, les empreintes peuvent être plus profondes; le fer comprimé se relève sur les bords de l'empreinte et forme une nappe en bourrelet. Pour des vitesses mêmes peu considérables, des plaques de fer de 0m08 d'épaisseur sont fendues jusqu'aux bords; avec de grandes vitesses, ces plaques sont percées de part en part. Le choc développe une grande chaleur, car les éclats ne peuvent être tenus dans la main et le fer présente des portions colorées en bleu qui indiquent un effet correspondant à une température d'environ 600°.

Ces effets sont essentiels à connaître pour juger du degré de résistance dont seraient susceptibles des armures en fonte ou en fer destinées à garantir quelques points importants des effets de l'artillerie.

Effets sur le plomb.

Quand un projectile est lancé contre une masse de plomb, il

comprime ce métal, s'y enfonce et rejette la matière de côté; celle-ci se relève en tulipe tout autour; la résistance est suffisante pour que le projectile s'y brise lorsqu'il le frappe avec une grande vitesse.

Effets sur la maçonnerie.

Les effets des projectiles contre la maçonnerie diffèrent beaucoup des effets contre les métaux; ces matériaux ne sont pas élastiques et se brisent sous une pression bien inférieure à celle que peuvent supporter les corps élastiques dont nous venons de parler.

Lorsqu'une masse de maçonnerie est frappée par un boulet animé d'une grande vitesse, les parties qui environnent le point touché se brisent jusqu'à une certaine distance; il se forme un entonnoir très-évasé, puis les projectiles continuent à s'enfoncer plus avant en formant un entonnoir très-peu évasé et distinct du premier. La matière qui est en avant et aux environs du projectile est brisée, réduite en poudre et une partie est projetée en arrière à 5 ou 6 mètres, du pied du mur. Le projectile lui-même est repoussé en arrière et ne se trouve pas au fond de l'entonnoir.

Des débris de maçonnerie assez gros sont lancés à plus de 50ᵐ en arrière, et peuvent atteindre les hommes placés dans les batteries.

Le choc violent du projectile dégage beaucoup de calorique, et s'il a lieu sur une pierre calcaire il en produit la cuisson et la transforme en chaux.

L'ouverture de l'entonnoir est d'environ 4 à 5 fois le diamètre des projectiles; les profondeurs varient et augmentent avec le calibre des boulets et avec leur vitesse; elles dépendent en outre de la dureté de la maçonnerie. Le choc d'un boulet contre le roc, produit à-peu-près les mêmes effets, mais les enfoncements sont moindres; cette matière jouit d'une certaine élasticité, de telle sorte qu'après avoir été violemment comprimée par le projectile, elle réagit sur lui. Ce projectile est chassé de son logement et lancé quelquefois à la distance de 150ᵐ; cela rend les expériences de cette espèce fort dangereuses.

La direction du choc du projectile peut être très-différente de la normale au mur, sans que ce projectile cesse de pénétrer; à me-

sure que cet angle augmente, la profondeur de l'enfoncement diminue, mais peu d'abord.

Lorsque cette direction est peu inclinée par rapport à la surface de la maçonnerie, le projectile, qui n'éprouve plus de résistance que d'un côté, est repoussé de l'autre, sans s'enfoncer beaucoup, et il ricoche sur la maçonnerie.

Il est important de connaître sous quel angle le boulet commence à ne plus s'enfoncer du premier coup et qu'il ricoche, afin de savoir jusqu'à quel degré d'obliquité on peut encore battre en brèche, par les moyens ordinaires, et dans quelles circonstances on peut atteindre avec quelqu'efficacité soit une porte à l'abri des coups directs du canon, soit des troupes cachées dans un fossé.

Cet angle, limite du ricochet, varie suivant la dureté de la maçonnerie et suivant la vitesse du projectile.

Des expériences faites à Metz en 1834 avec un canon de 12 de place contre la maçonnerie du revêtement de l'ouvrage à cornes de la citadelle de Metz, ont fait voir qu'avec les charges de 1/2, 1/3, 1/4, 1/6 du poids d'un boulet, le ricochet cessait dans le tir sous les angles respectifs de 20°, 24°, 33°, 43°; on observait de plus, que l'angle de réflexion sous lequel se relève le projectile, est plus grand que celui sous lequel il arrive; la vitesse restante après le ricochet sous ces angles est très-faible.

Ces résultats ont été obtenus pour une très-petite distance du canon au mur; pour des distances plus grandes, il faudrait tenir compte de la perte de vitesse provenant de la résistance de l'air; les résultats qui déterminent la limite des angles sous lesquels on peut faire brèche font voir aussi que les angles avec la normale à la muraille pouvaient être beaucoup plus grands que l'on ne le croyait avant les expériences.

Principes du tir en brèche.

D'après les considérations qui précèdent, nous allons examiner les principes sur lesquels on doit se fonder pour battre en brèche les revêtements d'un ouvrage qu'on attaque.

L'escalade étant ordinairement extrêmement difficile, surtout quand l'assiégé est averti des projets de son ennemi, on est généralement forcé d'abattre une partie d'une face d'ouvrage, pour entrer

dans une place de guerre. Dans une place bien construite nulle partie de maçonnerie n'étant vue de la campagne à portée du canon, il est fort difficile de pouvoir s'établir ailleurs que dans le chemin couvert ou sur la crête du glacis.

Lorsqu'autrefois on battait en brèche avec des boulets en pierre on était forcé, comme nous l'avons vu, à cause du peu de dureté des projectiles, de commencer par la partie supérieure, là où le mur présentait moins de résistance et de rabaisser ainsi les coups jusqu'à ce que l'on arrivât à hauteur des débris déjà formés.

Cette opération était nécessairement très-longue, elle donnait une brèche très-raide et souvent impraticable. Mais avec des projectiles résistants, comme les boulets en fonte, on peut opérer plus rapidement en coupant la maçonnerie, suivant des lignes convenablement choisies pour détacher des pans de muraille qui se brisent en tombant et qui soient recouverts par les terres qu'ils soutenaient et qui se sont éboulées.

Le premier boulet lancé, fait, comme on l'a vu, un évasement tronc-conique suivi d'un autre trou presque cylindrique. Vauban recommande d'augmenter ce trou pour former une coupure, en tirant continuellement à côté, jusqu'à ce qu'on produise la chute de la muraille; mais un projectile très-voisin du trou déjà fait, produit peu d'effet parce qu'il se dévie vers le premier et attaque peu la partie du revêtement encore intacte.

Depuis quelques années, on a pensé qu'il serait bien plus convenable de faire une seule coupure horizontale et des coupures verticales; de cette manière, le mur n'étant plus soutenu que par des contreforts et pesant de tout son poids, peut être facilement détaché.

On compte généralement que pour faire une brèche sur une largeur de 20^{m}, il faut, à 40^{m} de distance du revêtement, tirer 1500 projectiles de gros calibre; mais quand on devait tirer à une distance plus considérable, il fallait compter sur un nombre de projectiles beaucoup plus grand, à cause de la moindre certitude des coups et de la moindre pénétration des projectiles; aussi fallait-il aux distances de 600 à 650^{m} employer 8 à 9000 projectiles.

Si l'on est à petite distance, comme sur la crête du glacis ou dans le chemin couvert, on peut, en dirigeant convenablement

le tir, diminuer considérablement ce nombre de coups ; on a pensé que pour faire produire aux boulets tout leur effet, il fallait diriger les coups successifs sur une même ligne horizontale à des distances un peu plus grandes que le diamètre de l'entonnoir que forment les projectiles, puis ensuite tirer une seconde série de coups au milieu de l'intervalle des entonnoirs déjà formés, et ainsi de suite, toujours sur les parties les plus saillantes ; de cette manière, les premiers coups produisent tout leur effet et les seconds produisent des pénétrations plus grandes en frappant sur des parties isolées des deux côtés.

Lorsque la maçonnerie est suffisamment coupée sur une ligne horizontale, ce qu'on reconnaît à la terre qui s'écoule, elle n'est plus soutenue que par les contreforts; on opère alors des coupures verticales, dont deux aux extrémités de la brèche, en relevant peu à peu les coups, jusqu'à ce que le mur ainsi isolé de ses appuis, s'abaisse un peu, se renverse et se brise en éclats que viennent recouvrir ensuite les terres qui s'éboulent.

On a reconnu par les expériences faites à Metz en 1834, sur l'ouvrage à cornes de la citadelle, que pour ouvrir une brèche de 20 mètres de largeur, il fallait 263 boulets de 16, ou 174 boulets de 24, tirés avec une charge de la moitié du poids du boulet, ce qui revient dans l'un et l'autre cas à 50 kil. de poudre et 100 kil, de fonte par mètre courant de brêche.

Le temps nécessaire pour faire brêche, dépend ainsi du nombre de projectiles à tirer par chaque pièce ; on sait qu'il a été de 32 heures au siége de Lérida, de 3 jours au siège de Saint-Sébastien. A la citadelle d'Anvers, après 17 heures 1/2 de feu, la muraille n'était pas encore tombée.

Dans le tir d'expériences à la citadelle de Metz, il a été de 5 heures 1/2 avec le canon de 16, et de 5 heures 5 minutes avec le canon de 24 ; on tirait à raison de 12 coups par heure.

La détermination de la hauteur à laquelle doit être établie la coupure horizontale, est extrêmement importante ; car si elle n'est pas convenablement établie, la brèche est très-difficile et peut être impossible. En effet le prisme des débris de la maçonnerie et des terres éboulées est d'autant moindre que la hauteur de la coupure est plus grande, en même temps que le prisme des remblais nécessaires pour former un talus jusqu'à la partie coupée est aug-

menté ; si donc on établit trop haut la coupure horizontale, il arrivera qu'en haut du talus du remblai, il y aura un escarpement qu'il sera fort difficile de franchir et qui sera très-long à détruire.

Au contraire, à mesure qu'on abaissera la coupure le déblai du prisme d'éboulement augmentera, l'escarpement cessera d'exister et le talus sera de moins en moins raide. Mais si la hauteur de coupure est trop petite, les débris de maçonnerie, s'élèveront jusqu'à cette hauteur, avant que la muraille ne soit entièrement coupée ; ces débris ne s'écrouleront plus ; ils masqueront l'ouverture faite et empêcheront que l'on continue avec succès la coupure horizontale.

La hauteur la plus convenable est celle pour laquelle les débris de la coupure atteindraient le bas de cette ouverture, laquelle d'après le profil de la coupûre doit être à peu près égale à l'épaisseur du mur à l'endroit même où on l'établit.

Cette épaisseur, lorsqu'on ne la connait pas à l'avance, peut se déduire des dimensions qu'il a été nécessaire de donner à la muraille pour qu'elle résiste à la poussée des terres du rempart et du parapet. Ainsi pour la brêche à la citadelle dont il a été question, la maçonnerie ayant 2m au sommet et 2m 40 à la base, a été établie à 2m 25 de hauteur. La muraille avait là une épaisseur égale.

Effet des projectiles sur les bois.

L'effet des projectiles dans les bois varie avec la nature du bois et le sens suivant lequel ils pénètrent.

Si le bois est frappé perpendiculairement à ses fibres et si c'est du chêne, ces fibres élastiques sont en partie écrasées, les autres ploient sous la pression du projectile, mais se redressent après son passage ; de telle sorte que si le boulet a 0,m 10 de diamètre, le trou est entièrement rebouché et que le trou formé par un boulet de 24 peut être bouché par une simple cheville.

Si le bois est du sapin, comme les fibres sont alternativement molles et dures, les premières sont comprimées et les autres ne se relèvent qu'en partie ; le trou qui reste est plus grand que dans le chêne.

Si le bois est frappé dans le sens de ses fibres, elles se com-

priment, se redressent ensuite, mais se relèvent moins que dans l'autre cas.

Les effets dans des matières molles se transmettent rapidement à des distances sensibles ; ainsi des balles lancées dans une caisse de suif fondu et solidifié, compriment tellement la matière que la caisse est disjointe. Le même effet a lieu, si la caisse est remplie d'eau ; on évite cette dislocation en évasant les côtés de la caisse.

Effet des projectiles dans les terres.

Un projectile lancé dans des terres s'y enfonce de quantités variables suivant la nature de ces milieux ; il y produit un entonnoir qui va en s'évasant de plus en plus à partir de la position où il s'arrête, jusqu'à la face d'entrée où il a jusqu'à quatre fois le diamètre du projectile. Quand les terres sont suffisamment compressibles, comme les terres argileuses, on remarque sur les parois intérieures les portions touchées par les projectiles et écartées en tous sens, et si la terre est maintenue dans un coffrage la compression que fait éprouver le passage du boulet est telle, qu'à 0,^{m} 50, des madriers de 0,^{m}05 d'épaisseur sont brisés.

Profondeur de la pénétration des projectiles.

Il est important de connaître la profondeur de la pénétration des projectiles dans les milieux résistans ; c'est de la connaissance de ces effets qu'on peut déduire les épaisseurs à donner aux masses couvrantes, suivant la nature des matériaux qu'on emploie et les calibres dont on peut redouter les effets.

Si l'on admet que la résistance qu'un corps éprouve dans un milieu est indépendante de la vitesse et proportionnelle à la superficie du projectile, il en résulte que la pénétration est proportionnelle au carré de la vitesse du projectile au moment du choc. En effet, si E est la pénétration exprimée en calibres, δ la densité, V la vitesse au commencement de la pénétration, appelant r le rayon du projectile et R la résistance constante que le milieu fait éprouver au projectile, la quantité de travail de la résistance sera :

$$\pi\ r^2.\ E.\ 2\ r.\ R,$$

la force vive du projectile étant

$$\frac{4}{3}\ \pi\ r^3\ \frac{D}{g}.\ V^2.$$

On aura en vertu du principe connu des forces-vives

$$4\ \pi\ r^3\ RE = \frac{4}{3}\ \pi\ r^3\ \frac{D}{g}\ V^2,$$

d'où l'on tire en faisant $K = \frac{1}{3\ R\ g}$, $E = K V^2 D$.

Un projectile animé d'une vitesse V, ayant un autre diamètre, d'une densité d, donnera de même, en appelant e la pénétration exprimée en calibres $e = K\ v^2\ d$, de là on tire

$$E = e\ \frac{V^2}{v^2}\ \frac{D}{d},$$

c'est-à-dire, que les pénétrations sont proportionnelles aux carrés des vitesses, aux calibres et aux densités. On peut rapporter ces pénétrations à celles d'un boulet animé d'une vitesse de 500m, qu'on peut obtenir avec la charge du 1/3 du poids du boulet; l'on a alors :

$$E = e\ \frac{V^2}{(500)^2}\ \frac{D}{d}.$$

Cette formule ne peut représenter la pénétration des projectiles que dans des corps très-durs et ne convient pas pour ceux dont les parties peuvent être lancées en tous sens, parce qu'alors il faudrait tenir compte de la force-vive possédée par ces parties. Elle paraît se confirmer jusqu'aux vitesses de 500m par seconde, pour la fonte la maçonnerie et les bois.

D'après des expériences de tir avec différentes charges, on trouve pour des boulets animés de la vitesse de 500m, savoir :

Pour la fonte (suivant sa nature) de . . . . . . 1/5 à 1/6

Plomb . . . . 5 1/3 à 5 1/2

Roches de calcaires employées aux constructions de Metz 2

Maçonnerie de bonne qualité 4
Maçonnerie ordinaire de mœllons . . . . . . 5 à 5 1/2
Maçonnerie en briques. 8

En substituant ces valeurs pour e dans la formule (3) on aura les enfoncemens pour un calibre et une vitesse quelconque, ne dépassant pas 300^m.

Les boulets par leur choc contre les corps très durs, se brisent à certaines vitesses ; celles-ci croissent en sens inverse de la dureté du corps choqué ; l'expérience a montré qu'un boulet se brise lorsqu'il est tiré

Contre la fonte avec une charge de $\frac{1}{128}$
—Id.—le plomb. . . . . . . id. . . $\frac{1}{8}$
—Id.—les roches calcaires oolitique $\frac{1}{4}$
—Id.—la maçonnerie. . . . . . . $\frac{1}{3}$

Nota. Quelques boulets résistent à ces charges.

Les vitesses V des formules sont celles du projectile au commencement de la pénétration; si la bouche à feu était placée à une certaine distance du but, il faudrait tenir compte de la perte de vitesse dûe à la résistance de l'air.

La formule $E = e\frac{V^2}{v^2}\frac{D}{d}$ peut encore servir à calculer les pénétrations dans les bois, jusqu'aux vitesses qui ne dépassent pas 300^m par seconde, en employant pour le tir perpendiculaire aux fibres des bois, les valeurs suivantes de e.

Pour le chêne de qualité ordinaire... 12 1/2
Pour le bois d'orme. 16
Pour le sapin. . . . . 23.

Pour des vitesses supérieures à 300^m, la formule donnant des résultats trop grands on en doit conclure que la pénétration croit moins rapidement que le carré des vitesses.

Cette formule n'est plus exacte pour des corps très-pénétrables comme des terres.

On a cherché une formule empyrique qui représentât convenablement, pour la pratique, les résultats obtenus par de nombreuses expériences sur des terres de différentes natures. On a trouvé

que les enfoncemens croissaient comme les logarithmes d'une fonction de la charge dans les limites du tir en usage depuis des charges de moitié jusqu'à celles de 1/24 du poids du boulet. En représentant par μ le poids de la charge et par m celui du projectile, si on rapporte les enfoncemens à celui que donne une charge égale au 1/3 du poids du boulet, on aura pour l'enfoncement compté en calibres,

$$E = e^{\frac{\log\left(1+480\frac{\mu}{m}\right)}{\log\left(1+480\frac{1}{3}\right)}}\frac{D}{d} = e^{\frac{\log\left(1+480\frac{\mu}{m}\right)}{2.20683}}\frac{D}{d},$$

et pour l'enfoncement exprimé en unités linéaires, r étant le rayon

$$E_1 = 2\,r\,e^{\frac{\log.\left(1+480\frac{\mu}{m}\right)}{2.20683}}\frac{D}{d}.$$

Les valeurs de e pour l'enfoncement avec la charge du 1/3 du poids du boulet varient suivant la nature des terres, et sont données par la table suivante qui résulte principalement des expériences faites à Metz en 1834 :

Pour le sable mêlé de gravier. . . . e = 10 3/4

Pour la terre mêlée de sable et de gravier, ou pesant plus de 2 fois le poids de l'eau. . . . 11 3/4

Pour les terres végétales rassises (et pour les terres rapportées mêlées de sable et d'argile) . . 17 1/2

Mêmes terres rapportées ou terres très-légèrement rassises. 19

Pour l'argile de potier humide 24 1/2

La même argile mouillée 36

Terres légères d'anciens parapet. 26

Mêmes terres nouvellement remuées . . . 32 1/2

Terres très-légères 30

Mêmes terres rapportées ou terres mouvantes 40

La formule que nous venons de donner contenant la charge de la bouche à feu et non pas la vitesse, et celle-ci variant avec la longueur d'âme de la bouche à feu, la formule ne peut pas servir pour toutes les bouches à feu; elle ne convient qu'à celles dans

lesquelles la charge a le temps de produire à peu près tout son effet, comme celles de 17 à 20 ou 23 calibres, c'est-à-dire, aux canons de campagne et de siége.

Il a été fait tout récemment des expériences sur les pénétrations des projectiles dans l'eau. La formule précédente peut servir à représenter les résultats en remplaçant $480 \frac{\mu}{m}$ par $4,800 \frac{\mu}{m}$ et sachant que pour la charge 1/3, l'enfoncement est de 275 calibres.

Pour les bois, il faudra prendre $48 \frac{\mu}{m}$.

Dans cette formule les bouches à feu sont supposées à 15 ou 20^m du but ; pour estimer les effets des projectiles à toutes les distances, il faut connaître les pertes de vitesse dans l'air.

Effets des projectiles sur les corps animés.

Les effets des projectiles sur les corps animés ne peuvent pas être calculés comme les effets sur des matériaux que l'on se propose de briser ; ils ne sont nullement proportionnels aux enfoncements ; car dès qu'un projectile sera capable de donner la mort, peu importe qu'il pénètre plus ou moins avant ; son effet ne saurait être augmenté. Les expériences de ce genre, doivent donc être dirigées d'une manière différente ; elles sont fort difficiles et fort dispendieuses à faire sur des animaux et les seuls résultats que l'on ait sur des hommes, sont ceux que les hasards de la guerre ont permis de recueillir, ou bien celles qui ont été faites sur des mannequins qu'on a disposés et arrangés de manière à ce qu'ils se rapprochent le plus possible des corps animés.

Ces expériences ont été faites en Danemarck ; on employa un mannequin habillé et équipé militairement et placé sur un cheval vivant; derrière celui-ci, on avait disposé un panneau en planches de sapin, sur lequel portaient les coups qui manquaient le but ; ces coups produisaient des enfoncements qui servaient alors de terme de comparaison entre les effets des coups qui touchaient le mannequin ou le cheval et les effets ordinaires des projectiles sur les matériaux. Des expériences faites avec des balles de fer de divers diamètres, il est résulté que :

1° Les balles de 1/2 once (Danoise) ou du poids de 16^g6 ayant ensuite un diamètre de 16^mm0, lorsqu'elles s'enfoncent dans le

bois de la moitié du diamètre, ne sont que de peu d'effet et rebondissent sur la peau du cheval.

2° Lorsqu'elles s'enfoncent de leur diamètre, elle commencent à être meurtrières; mais ne mettent pas toujours les hommes et les chevaux hors de combat.

3° Lorsqu'elles percent une planche de 30^{mm} elles sont très-meurtrières.

On peut chercher à l'aide de ces résultats quel effet peuvent produire les différens projectiles qu'on emploie.

Les balles de fusil d'infanterie de 7^{li}, 3^{pt} de diamètre, pesant $25^{g}6$ produiront suivant leur vitesse les trois effets qu'on vient de distinguer correspondant à divers enfoncemens dans le bois de sapin ou à diverses distances du fusil savoir :

	1° Légères contusions, les balles rebondissant sur la peau du cheval.	2° Les balles commencent à être meurtrières sans mettre toujours hors de combat.	3° Les balles sont très meurtrières.
Pénétration dans le bois de sapin	8 mm	16 mm	30 mm
Ces effets sont produits par la balle du fusil d'infanterie tirée à la charge ordinaire, aux distances de .	400 m	300 m	250 m

On voit par là, qu'à la distance même de 250^{m} l'effet du fusil d'infanterie est encore assez grand, puisque la balle est très-meurtrière.

La balle de fusil de rempart peut produire ces effets, pourvu qu'elle pénètre de 3/4 de son diamètre dans le bois de sapin, ce qui aura lieu au-delà de 600^{m}.

Ces résultats permettent aussi de préjuger l'effet qu'auraient les feux verticaux dont on a souvent proposé l'usage et particulièrement pour la défense des places fortes, tels que des fusils tirés à 45° et d'autres projectiles lancés dans des pierriers ou des mortiers.

La vitesse que peut prendre dans l'air, un projectile qui tombe par son propre poids a une limite qui croit avec le calibre et la densité du projectile. On verra d'après cela que la balle du fusil d'infanterie ne peut acquérir qu'une vitesse capable de produire des contusions. Pour que de cette manière la balle put produire les trois effets distingués plus haut, il faudrait qu'elle fut respectivement du poids de 1° à 1° 1/4 (30 à 38^g); 1° 3/4 (53^g), 2° 1/2 (75^g). On voit que la balle de fusil de rempart de 8 à la livre (67^g) commencerait à être efficace, puisqu'elle occasionnerait des blessures graves.

Si les balles lancées, étaient en fer battu, la densité de ce métal étant moindre, les balles devraient être d'un poids plus considérable et on reconnait que les poids devraient être respectivement de 2° à 2° 1/2 (60 à 75^g); 4° (120^g); 6° 1/2 (200^g). On voit par là que les balles de boites à balles de 12 (du poids de 7° ou 218^g), produiraient généralement des blessures mortelles, celles de 8 (4° 3/4 ou 142^g) ne peuvent pas toujours mettre hors de combat et que les anciennes balles de 4 (70 à 75^g) ne produiraient que des blessures légères.

Ces résultats peuvent encore servir à calculer les distances auxquelles on peut compter sur l'efficacité des balles de fer lancées avec les canons et les obusiers des différents calibres; on a reconnu que les balles ont encore assez de vitesse pour produire des effets meurtriers aux distances suivantes, savoir :

Les balles de 12 lancées avec le canon de 12 à la distance de 800^m
—— id. ———— l'obusier de 6^{po} —— id. —— 700
—— 8 —— id. —— le canon de 8 —— id. —— 700
—— id. ———— l'obusier de 24 —— id. —— 600

Il faut remarquer que les considérations de la vitesse qui reste aux balles, ne sont pas les seules qui puissent décider de la distance à laquelle on doit faire usage d'une arme ; cette détermination dépend encore de la justesse du tir, c'est-à-dire du degré de probabilité qu'on a d'atteindre, élément qui dépend aussi de l'étendue du but sur lequel on tire.

Ainsi le fusil d'infanterie n'a d'efficacité que jusque 150 ou 170^m, tandis que la balle conserve assez de vitesse pour être très meurtrière jusqu'à la distance de 250^m.

D'après les résultats relatifs aux balles de fer de 8 et de 12, il

est aisé de voir qu'un boulet conserve assez de vitesse à des distances bien plus grandes que celles auxquelles on l'emploie et qu'il pourra même agir avec effet sur plusieurs hommes à la fois ; l'on peut citer plusieurs faits remarquables des actions multiples d'un seul boulet; ainsi pendant la campagne d'Italie en 1470 un boulet renversa 30 hommes armés et recouverts des cuirasses légères en usage à cette époque; à la bataille de Zorndorf un seul boulet prussien renversa 42 grenadiers russes et les mit hors de combat.

On a fait des expériences pour calculer les effets dont seraient susceptibles sur des chevaux rangés en lignes des boulets de différens calibres et on les compara aux effets probables sur des hommes, en estimant qu'un cheval offrait la même résistance que deux hommes ; on a calculé, en tenant compte de la résistance de l'air, les effets qui auraient lieu à diverses distances du but ; on en a déduit les résultats contenus dans le tableau suivant :

CALIBRE DU BOULET		VITESSE INITIALE	NOMBRE D'HOMMES RENVERSÉS AUX DISTANCES DE			OBSERVATIONS
			0, bout portant	à 300 mètres (environ)	à 600 mètres (environ)	
Equivalant au boulet français de	24	450 m	70	55	44	
	12	480	63	48	36	
	6	500	55	39	28	
	3	510	45	30	19	

Boîtes à Balles.

L'emploi des boîtes à balles présente de l'avantage sur les boulets lorsqu'on tire sur un but étendu et rapproché et que les objets à détruire offrent peu de résistance ; mais dans d'autres cas, soit lorsque les objets sont plus éloignés, ou qu'ils offrent plus de résistance et qu'ils permettent au projectile d'utiliser toute la force vive qu'il possède, l'emploi du boulet est pré-

férable ; il produit en outre beaucoup d'effet moral en mettant d'un seul coup et sur le même point, un grand nombre d'hommes hors de combat.

Les grappes de raisin, sont formées de grosses balles en fonte de fer rangées autour d'un axe en fer forgé, fiché dans un plateau circulaire en bois ou en fer battu et reliées par du mastic et par une forte toile et du fil de fer. On a renoncé aux balles en plomb parce qu'elles se déformaient et produisaient peu d'effet. F. 24

Les Anglais ont adopté pour leurs grappes de raisin des projectiles plus pesants que ceux de nos boîtes à balles ; ils en disposent 3 couches de 3 chacune, entre des plateaux circulaires en bois, dans lesquels sont pratiqués des logemens de la forme d'une calotte sphérique pour les y maintenir ; les couches sont alternées de manière qu'une balle correspond à un intervalle des couches voisines ; les quatre plateaux sont reliés fortement par un boulon qui les traverse et un écrou. Dans le tir ce boulon se brise et les projectiles se séparent. F. 25

Ces balles sont d'un diamètre un peu moindre que la moitié de celui du boulet du calibre correspondant ; leur poids en est le 1/9 environ ; ainsi les 9 pèsent à peu près autant que le boulet.

Les balles des boîtes à balles Françaises sont d'un diamètre du tiers de celui du boulet et pèsent environ 1/28 ; les 41 balles pèsent ainsi, sans la boîte ni le culot, une fois et demi le boulet.

Les obus ne se brisent qu'après le tir, par l'explosion de la poudre qu'ils contiennent, ils ont, sous les mêmes dimensions extérieures une densité moyenne moindre que celle des boulets ; de sorte que, comparativement aux balles, il y a à considérer les effets relatifs au trajet et ceux relatifs à l'explosion. Sous le premier rapport, ils éprouvent de la part de l'air moins de résistance que les balles qui seraient disjointes dès le commencement du trajet, et par suite, ils ont plus de justesse ; ils n'atteignent d'abord qu'un point et frappent comme un projectile ordinaire ; ce n'est qu'ensuite, que l'explosion leur fait produire l'effet de projectiles creux. Les épaisseurs et le calibre, doivent être combinés de manière

que l'obus contienne assez de poudre pour que les parois soient brisées et se divisent en un grand nombre d'éclats et qu'ils soient animés d'une assez grande vitesse.

Le volume intérieur d'un obus est ordinairement compris entre la moitié et le tiers du volume extérieur ; de sorte que la densité est réduite à 1/2 ou 2/3 de celle du boulet de même calibre. Il faut en excepter le cas où ils sont destinés à contenir des balles, dans lequel le volume intérieur est proportionnellement plus grand.

Les obus éclatent en un nombre d'éclats qui varie suivant les calibres et suivant les épaisseurs.

Les effets de l'explosion des projectiles creux sont assez difficiles à évaluer, et l'on a fait à ce sujet en Prusse des expériences intéressantes sur les effets des obus et des bombes; on éleva deux panneaux cylindriques et concentriques en toile, l'un de 10 pieds (3^m, 14) l'autre de 20 pieds (6^m, 28) de diamètre et ayant 6 pieds (1^m, 89) de haut, pour connaître le nombre d'hommes qu'un de ces projectiles creux aurait mis hors de combat, s'il eut éclaté près d'un peloton ou d'un bataillon.

Les projectiles étaient placés au centre et ont donné les résultats consignés dans le tableau suivant :

ESPÈCE ET NOMBRE DES PROJECTILES	CHARGE DES PROJECT.	NOMBRE DES ÉCLATS dans le 1er panneau	NOMBRE DES ÉCLATS dans le 2e panneau	OBSERVATIONS
10 obus de 7tt stein (ou 24)	12on (0^k, 35)	71	40	59 éclats d'obus de 6o (10tt stein) et 22 bombes de 10o sont restés dans l'intérieur des panneaux
10 obus de 10tt stein (de 6o)	16on (0^k, 47)	67	50	
5 bombes de 10o	48on (1^k, 40)	26	16	

On voit que les obus ont produit moyennement 7 éclats dans le premier panneau et 4 à 5 dans le second, leur nombre étant

d'environ 14 à 15; et comme les éclats ont tous assez de poids et de vitesse pour mettre hors de combat, on voit que les obus français de 24 produisent à petite distance autant d'effet que ceux de 6 pouces; ces derniers cependant auraient de l'avantage à des distances plus grandes à cause de la grosseur des éclats.

Les bombes ne se divisant pas en un assez grand nombre d'éclats, produiraient peu d'effet sur des être animés. Les effets des projectiles creux sont loin d'augmenter proportionnellement à leurs dimensions, aussi les anciennes bombes de 18° de diamètre appelées Comminges, pesant 500ᵗᵗ et pouvant contenir une charge de 25ᵗᵗ de poudre ont-elles été abandonnées.

La bombe du mortier essayé à Anvers en 1832 avait 22° de diamètre, elle pesait 500 kil. et contenait 50 kil. de poudre.

Chargée avec 15 kil. de poudre, elle produisit 9 éclats.
id. 20 kil. id. 12 éclats.
id. 25 kil. id. 13 éclats.

Quelques-uns de ces éclats pesaient jusqu'à 80 kil.; ceux-ci n'étaient lancés qu'à 27ᵐ seulement, tandis que les éclats des obus de campagne sont lancés jusqu'à 4 ou 500 mètres. On a été encore audelà de ces dimensions déjà monstrueuses; ainsi, on a lancé, pour essai seulement à Metz, en 1830 des projectiles de 1ᵐ 00 de diamètre qui pouvaient contenir 100 kil. de poudre.

Les gros projectiles contenant beaucoup de poudre pourraient produire beaucoup d'effet dans certaines circonstances, dans les terres par exemple, s'ils pouvaient pénétrer assez avant.

Les obus à balles ou boîtes à balles sphériques des anglais, dits obus à la Schrapnel, contiennent de la poudre pour les faire éclater et des balles de plomb qui sont lancées avec la vitesse possédée par l'obus au moment de l'éclatement; ces balles, un peu déviées par cet effet, arrivent sur le but en embrassant une certaine étendue, comme si elles partaient du point où a eu lieu l'explosion. Les obus à balles sont principalement destinés à suppléer les boîtes à balles, aux longues distances. On a donné à ces obus une très-faible épaisseur, afin qu'ils puissent contenir autant de balles que possible et qu'ils ne nécessitent qu'une faible charge pour éclater. Les balles étant environnées de poudre sont pressées à peu près également en tous sens au moment de l'explosion, et ne s'écartent que fort peu; si donc l'obus éclate près de la ligne ennemie, les

balles resteront unies; la masse suivant toujours la trajectoire, ne toucherait qu'un point et ne produirait pas l'effet d'éparpillement qu'on se propose. Si l'obus éclate assez loin, les balles s'écarteront convenablement; mais s'il éclate à une trop grande distance, les balles dans leur trajet perdront beaucoup de leur vitesse et pourront ne plus frapper avec assez de force. On doit donc faire éclater l'obus à une distance déterminée de la ligne ennemie, et, par suite, donner à la fusée la longueur convenable pour chaque position: cette condition rend très difficile l'emploi de ce projectile et nécessite des canonniers très habiles.

Les balles employées en Angleterre sont de 14 à la livre anglaise 15 à la livre française; étant ainsi un peu plus pesantes que les balles françaises de 19 à la livre française, il ne leur faut pas 150^m de vitesse pour être aussi meurtrières, mais seulement 140^m au moment où elles frappent. C'est cette vitesse qui doit régler la longueur de la fusée, lorsqu'on connait la distance à laquelle est l'ennemi et la vitesse de l'obus au moment de l'éclatement.

L'obus de campagne a toujours plus de vitesse qu'il n'en faut pour qu'éclatant à une distance assez petite la balle puisse être très meurtrière; mais si l'on se trompe de 1/10 en desssous sur l'estimation de la distance et de 2 à 3 millim. dans le même sens sur la longueur de la fusée, celle-ci pourra être trop courte; par cette double raison, l'obus éclatant trop loin de l'ennemi, les balles arriveront au but avec trop peu de vitesse et ne produiront plus assez d'effet; à mesure que les distances augmentent les erreurs sur les distances augmentent aussi.

En tenant compte de toutes ces considérations, on verra qu'avec les calibres de 3^{tt} (anglaises) à 600^m les effets sont nuls, mais que cette distance peut convenir aux calibres supérieurs; qu'à la distance de 800^m, le calibre de 9 commence à être assez efficace et que la distance de 1000^m ne convient qu'aux calibres de 18 et de 24. On voit aussi que les probabilités d'effets augmentent avec la grosseur du calibre.

Ces différences d'effets dépendant des distances et de l'habilité des canonniers, expliquent les divergences d'opinion sur ce projectile; on conçoit, que les Anglais aient pu les vanter d'après leurs expériences, tandis que d'autres les trouvaient de peu d'effet, d'après les résultats observés dans les guerres d'Espagne.

Les Danois emploient de ces obus du calibre de 12 et de 6 avec des balles de 20 à la livre.

On pourrait faire usage en France de la balle de fusil de rempart ou même de balles de fer dans l'obus de 8^{po}; leur emploi serait avantageux pour la défense des places, lors de l'ouverture de la tranchée et comme la distance du terrain est bien connue à l'avance et serait la même pendant un certain temps, l'emploi de ce projectile serait plus sûr et plus facile qu'en campagne.

En parlant de l'effet des projectiles dans les terres, nous n'avons pas tenu compte de celui qui pourrait être produit par l'explosion de la charge de poudre qu'un obus contient. Cet effet ne parait dépendre que de cette charge et l'on a trouvé que pour les terres ordinaires le nombre de mètres cubes du déblai sur lesquels s'étend l'effet de l'explosion est égal au nombre de livres de poudre de la charge employée.

Cet effet ne pourra être complet qu'autant que le projectile sera suffisamment enfoncé, alors le terrain est comprimé ou désagrégé, de manière à former le volume calculé d'après la règle ci-dessus; si la distance à la surface du sol est moindre, le projectile fait l'effet de fougasse et produit un entonnoir, dont le volume dépend de la nature des terres.

Au siége de la Citadelle d'Anvers en 1832, les bombes de 10^{po} qu'on a employées étaient chargées de 3^{tt} de poudre, elles s'enfonçaient en terre, et formaient par l'explosion un entonnoir de 3^{pi} de profondeur et 5^{pi} de diamètre; l'entonnoir de celles de 500^{tt} du calibre de 22^{po} avaient 3^{pi} 1/2 de profondeur et 8^{pi} 1/2 de diamètre. Dans les terrains mous ces derniers enfoncements allaient jusqu'à 2^{m} et l'entonnoir avait 4^{m} de diamètre.

Voici encore quelques effets d'explosion de projectiles creux :

4 obus de 6^{po} du poids de 20^{tt} chargés de 16^{on} de poudre et 22 — id. — 24 ———— 14^{tt} — id. ——— 13^{on} —— id. — lancés de la distance de 125^{m} sur le talus d'un rempart incliné à 75°, de 20 pieds d'épaisseur et 18 pieds de hauteur, ont fait une brèche praticable ayant 26 pieds de largeur au pied et de 8 pieds à hauteur. 9 obus de 24 tirés avec une pièce de 24 ont fait cesser le feu d'une batterie placée à 500^{m} de distance.

Cet emploi des projectiles creux est encore très efficace lorsque

la brèche est faite au corps de la place, pour faire ébouler les terres, lorsque les talus sont encore très-raides dans la partie supérieure; alors, il faut tirer avec des charges telles que l'enfoncement soit égal au rayon de la sphère d'action correspondant à la charge du projectile, sans que, néanmoins, le choc contre le terrain, ne fasse briser les projectiles.

Pour produire cet effet complètement sur une brèche de 20 mètres de largeur, il faudrait 30 à 40 obus de 8po ou 100 à 120 obus de 6po et de 24.

A l'expérience de la brèche de la citadelle de Metz, on a produit les 3/4 de ces effets avec 20 obus de 8po.

ECOLE D'APPLICATION DE L'ARTILLERIE ET DU GÉNIE.

COURS D'ARTILLERIE.

Effets de la Poudre.

Les armes de trait et de jet des anciens, fondées sur un seul et même principe de construction, étaient les arcs, les balistes, les catapultes. Ces armes, capables parfois, de lancer des masses considérables, ne pouvaient cependant leur imprimer que de faibles vitesses parceque toute la force de pulsion dontelles étaient douées, consistait dans l'action de ressorts se débandant instantanément.

Un nouvel agent infiniment plus énergique, a fait renoncer petit-à-petit à ces machines peu puissantes. Cet agent est la poudre, qui, bien que connue des Alchimistes depuis de longues années, ne fut appliquée qu'assez tard à l'art de la guerre.

La poudre semble avoir été en usage dans l'Orient, dès une époque fort reculée, puisqu'en Perse elle était employée en 1173 à la confection d'artifices. Le grand Albert indique cet usage de la poudre, dans les ouvrages hermétiques qu'il publia vers 1250. A la même époque Marcus-Grœcus fit paraître un livre sur le feu propre à brûler les ennemis, tant sur terre que sur mer, et donna le moyen de construire des fusées et des pétards qui éclataient avec bruit, en employant un mélange bien pulvérisé de 6 parties de salpètre, une de soufre et deux de charbon. Roger-Bacon, écrivain de la fin du même siècle, dit qu'on peut imiter le bruit du tonnerre, le surpasser même et produire des feux plus brillants que les éclairs, avec du salpètre, du souffre et du charbon, lesquels séparément ne font aucun effet, mais qui, étant mêlés ensemble et renfermés dans quelque chose de creux et de bouché font plus de bruit et d'éclat qu'un coup de tonnerre. Il ajoute, qu'on pourrait à l'aide de cette composition détruire une ville ou une armée.

Le hasard développa les idées que ces différens écrivains avaient

émises et amena l'essai de la poudre comme ressource de guerre. En 1320, un moine allemand, nommé Berthold Schwartz, de Fribourg, s'occupant à préparer le mélange de salpètre, de soufre et de charbon, indiqué par Marcus, avait déposé sa mixtion dans un mortier recouvert d'une grosse pierre; le feu y prit par accident et la pierre fut lancée au loin avec une très-grande force. L'expérience fut renouvelée, et, à partir de cette époque les gens de guerre sentirent le parti qu'ils pouvaient tirer de la poudre. On s'en servit probablement dès lors, mais en tâtonnant et avec assez peu de succès, car on ne trouve de trace de l'application de ce nouvel agent qu'à partir de 1330. Les premiers essais eurent lieu dans les siéges et furent d'abord très-restreints, parce que, suivant un ancien auteur, la poudre causait plus de frayeur à ceux qui l'employaient que de mal à ceux contre lesquels elle était mise en usage.

Ce fut vers 1503 seulement qu'on en fit usage dans les mines; les essais tentés jusqu'alors et notamment en 1487, ayant été infructueux. Mais, à dater du commencement du 16e siècle, l'usage de la poudre prit une grande extension et devint général.

La poudre de guerre fut longtemps employée à l'état de poussière ou de *poudre* dont elle conserva le nom; mais on fut obligé de renoncer à ce mode de fabrication pour le tir des armes portatives. En effet, il devenait bientôt difficile d'y introduire la charge, que la crasse humide produite par les premiers coups, empêchait de glisser jusqu'au fond du canon. On prit donc le parti de grainer la poudre destinée à l'usage des petites armes et qui prit alors le nom de poudre à mousquet.

Dès que l'on fit usage de la poudre à mousquet on reconnut que deux parties de cette poudre, produisaient autant d'effet que trois de poussier ou pulvérin; mais les armes à feu de gros calibre n'offraient pas assez de résistance, pour qu'on pût se servir de la poudre grainée. Le pulvérin continua donc d'être employé et ne fut complètement abandonné que vers la fin du 16e. siècle.

Pour grainer la poudre on se contenta d'abord de piler les galettes à la main, et de les réduire en fragmens irréguliers de la grosseur d'un pois. On ne tarda pas à reconnaître les avantages qu'il y avait à donner les plus grands soins à toutes les parties de la fabrication de la poudre, et sans modifier notablement les pro-

portions premières des composans, on fit porter toutes les améliorations sur les procédés de manipulation.

Il a dû nécessairement résulter des perfectionnements introduits dans la fabrication de la poudre, que ces effets ont augmenté et que les dégradations opérées dans les pièces mises en usage sont devenues plus grandes aussi. Par suite il a fallu modifier l'épaisseur et le tracé des parties internes des bouches à feu, pour les rendre capables de la résistance nécessaire. On sent donc qu'il existe une certaine relation qu'il est indispensable d'étudier et de connaître, entre les formes et les épaisseurs des bouches à feu, la nature et le mode d'action de l'agent qu'elles sont destinées à contenir et à diriger dans ses effets.

Depuis les premiers temps de l'emploi de la poudre, cette relation a été le sujet de longues discussions et d'une foule d'explications et de théories que l'expérience n'a pas confirmées.

Pour arriver à établir cette relation importante d'une manière rationnelle, il est indispensable d'avoir d'abord des idées fixes et précises sur le premier phénomène qui se présente, c'est-à-dire, la combustion de la poudre. Nous allons donc nous en occuper.

Il est évidemment impossible d'embrasser de prime abord tous les détails d'un phénomène aussi compliqué et aussi instantané que l'explosion de la poudre. Ni l'œil, ni la pensée ne sont capables de saisir les relations qui existent entre des faits partiels, lorsque ceux-ci se produisent avec une rapidité telle que chacun d'eux n'apparaît que d'une manière confuse au milieu des autres. Il y a donc nécessité d'apporter dans l'étude de ces faits la méthode de l'analyse qui, en procédant lentement et partiellement, n'en arrive que plus surement au but. Nous devons donc partir des résultats de l'expérience, isoler autant que possible les faits particuliers, sans cependant les dénaturer, les étudier séparément, puis, chercher à les lier entr'eux en profitant de tout ce que les sciences physiques ont appris sur la nature et les propriétés des corps que nous avons à considérer.

Si le grand nombre des circonstances qui peuvent influer sur les résultats de l'explosion de la poudre, et surtout l'énorme tension des gaz développés, ne permettent pas de tenir un compte exact de tout ce qui se passe dans ce phénomène et d'obtenir d'une manière rigoureuse la mesure de tous ses effets, on peut du moins

déterminer les limites entre lesquelles sont comprises les expressions des principaux résultats, ce qui suffit pour les besoins de l'artillerie.

D'ailleurs ces résultats ont été appliqués lors de la création de nouveaux obusiers tant en fonte qu'en bronze, ajoutés ou substitués aux obusiers du système de Gribeauval, et l'expérience les a sanctionnés, puisque les nouvelles bouches à feu ont pleinement satisfait à toutes les conditions de perfectionnement que l'on s'était imposées en les construisant. Par suite, les considérations qui ont servi à la détermination complète de ces nouvelles bouches à feu, peuvent être présentées avec plus de confiance qu'une simple théorie que rien n'aurait justifié.

Les notions sur la composition et la fabrication de la poudre faisant partie du cours de chimie, nous ne nous occuperons que de sa décomposition ou combustion, en tenant compte de tous les phénomènes physiques qui l'accompagnent.

La poudre peut être enflammée par une étincelle électrique, par le contact d'un corps en ignition, ou par une chaleur subite de 240° à 250° de Réaumur. En l'échauffant graduellement et lentement, elle se décomposerait sans explosion, parce qu'il n'y a pas combinaison et que le soufre, se sublimant vers 250°, se dégagerait en entraînant un peu de charbon. Le choc peut produire un développement de chaleur suffisant pour enflammer la poudre de guerre, comme les poudres fulminantes; on a cru longtemps que le fer était le seul métal susceptible de produire par le choc un dégagement de calorique suffisant pour enflammer la poudre; des expériences récentes faites devant tous les membres du comité consultatif des poudres et salpètres, ont pleinement établi que le choc du cuivre contre le cuivre, du cuivre contre le fer, du plomb contre le plomb et même du plomb contre le bois pouvait enflammer la poudre de guerre, Il résulte de ces expériences qu'il est d'un haut intérêt dans le maniement des poudres, d'éviter les chocs violents, quels qu'ils puissent être.

Le temps nécessaire à l'inflammation de la poudre varie suivant les circonstances. Ainsi, par exemple la poudre humide demande naturellement plus de temps pour s'enflammer que la poudre bien sèche, à cause de la déperdition du calorique absorbé par l'évaporation de l'eau. De même les poudres anguleuses sont

plus promptes à s'enflammer que les poudres à grains ronds, par la même raison qu'un charbon que l'on approche d'une lumière s'allume plus rapidement s'il offre un angle saillant, que la flamme peut entamer, que s'il présente à son action une surface sphérique ou cylindrique.

D'après la méthode analytique que nous nous sommes proposé de suivre, nous allons examiner le mode de combustion d'un grain isolé de poudre de guerre, sauf ensuite à considérer les modifications que doit nécessairement apporter dans le phénomène, l'entonrage de grains homogènes et analogues qui composent une charge.

D'après la méthode de fabrication, les grains de la poudre de guerre peuvent avoir au maximum un diamètre de deux millimètres et demi. (Les poudres de guerre, pour être reçues, doivent passer à travers un tamis ou grénoir dont les trous ont ce diamètre, et doivent en outre ne pas passer à travers un second tamis dont les trous ont 1 mill, 40 de diamètre).

Un pareil grain de poudre se comburant complètement en 1/10 de seconde, il est impossible d'observer en aucune façon le mode de combustion et nos sens trop faibles se refusent à cette appréciation : on aperçoit immédiatement un globe de feu qui entoure le grain, sans pouvoir se rendre compte de la manière dont la combustion se propage.

Si nous prenons un grain plus gros, les galettes desquelles ces deux grains de dimensions différentes ont été distraits, étant parfaitement homogènes, les phénomènes de la combustion seront nécessairement identiques et tout à fait indépendants de la dimension. Par suite nous pourrons ainsi percevoir quelques faits qui nous échappent pendant la combustion d'un grain ordinaire de poudre de guerre.

Supposons qu'en un point de la surface d'un grain, d'un centimètre cube, par exemple, on porte, à l'aide d'une pointe, une chaleur de 250° de Réaumur, le point touché s'élève instantanément à cette température ; les gaz se développent très-rapidement et leur volume est égal à 8000 fois, le volume de la partie brûlée. Malgré cette expension énorme les gaz ne sont pas ramenés à un degré de température inférieur à 250°, et sont, par conséquent, capables d'enflammer eux-mêmes les grains en contact desquels ils se trouvent instantanément portés. Ces gaz peuvent à l'air libre ,

porter l'inflammation jusqu'à 8 ou 10 fois le diamètre de la partie comburée. Toutes les parties s'enflamment donc, dégageant à leur tour des gaz capables d'enflammer des parties plus éloignées du grain de poudre et de proche en proche toutes ces parties, à l'exception de celles suivant lesquelles le grain repose sur un plan quelconque, se trouvent entourées de gaz capables d'enflammer la poudre.

En un clin d'œil tout le grain était consumé : on a cherché à observer ce mode d'inflammation jusque sur des grains cubiques du poids de trois livres, mais sans succès. On a imaginé alors de prendre une espèce de barreau de poudre de 360 millim. de longueur, (fig. 27) sur 24 à 25 millim. d'équarrissage et pesant 330 grammes, que l'on a trempé dans du saindoux pour le soustraire autant que possible à l'action des gaz dégagés. On a trempé la partie inférieure un vase contenant de l'eau destinée à neutraliser l'effet des globules enflammés, qui, en coulant des parties en combustion, eussent pu transmettre l'inflammation à l'autre extrémité du barreau, et l'on a pu ainsi observer le mode de transmission de la combustion ; on a vu qu'il s'opère par couches parallèles successives et de manière qu'une couche ne s'enflamme qu'à mesure que celle qui la précède est complètement comburée.

Il est clair que si le barreau contenait des porosités ou cavités, la combustion ne pourrait plus se transmettre par couches parallèles, et que les gaz allant se loger dans ces cavités, y détermineraient l'inflammation et pourraient même faire naître des explosions dangereuses pour l'observateur. Le temps exigé pour l'entière combustion d'un barreau semblable et observé avec un chronomètre capable de fournir l'appréciation de dixièmes de seconde, a été de 29",2 ce qui donne une vitesse de combustion de 0m01233 par seconde.

On peut reconnaître facilement que la vitesse de cette combustion a une influence très-grande dans les phénomènes que présente le tir du canon, puisque le boulet étant moyennement animé d'une vitesse de 500m par seconde, il s'en suit qu'il sera arrivé à 50m de la bouche de la pièce à l'expiration du dixième de seconde nécessaire à la combustion complète d'un grain de poudre, puisqu'en nombres ronds la combustion met un dixième de seconde à se transmettre de la surface au centre d'un grain ordinaire.

Plus les grains sont gros, plus le temps qu'exige la combustion totale est grand lui-même. On a fait des expériences à ce sujet à l'aide du mortier éprouvette. En le chargeant avec une seule galette du poids d'une once, le globe ne sort pas de l'âme; si l'on divise cette galette en 7 ou 8 morceaux, le globle est à peine rejeté hors de l'éprouvette; en divisant en 12 ou 15 grains, le globe est porté à 3 mètres; avec 50 grains il est porté à 9m085 et enfin avec une once de bonne poudre de guerre, il est porté moyennement à 52 mètres.

En 1818 on s'est occupé à Dresde d'expériences sur la grosseur qui convient aux grains de la poudre de guerre, et on a reconnu qu'en leur donnant une grosseur plus forte que celle qui est adoptée, ces grains étaient projetés hors de la pièce sous la forme d'une sorte de pluie de feu : de même en tirant sur un écran de papier avec un fusil de chasse chargé de poudre à gros grains et à une distance de 10 pas, l'écran a été percé de 36 à 40 grains, et en se rapprochant à 4 pas, le nombre des grains non comburés qui ont traversé le papier a été beaucoup plus considérable. Enfin nous citerons une dernière expérience que l'on doit à Rumfort; ayant placé au fond d'un canon de pistolet un morceau de fer rougi au feu, il a glissé par-dessus un morceau de galette de poudre qui s'est enflammé a été projeté et a traversé plusieurs écrans de papier avant d'être entièrement comburé. L'expérience prouve même que des grains projetés peuvent s'éteindre dans l'air.

La vitesse de combustion varie naturellement avec l'état de la poudre et avec la densité de la galette. La présence ou l'absence des pores favorisant ou gênant la transmission de la combustion. La vitesse de 0m,01233 que nous avons donnée doit être considérée comme relative à la poudre de guerre ayant une densité de 1,530 en prenant celle de l'eau pour unité.

On a reconnu que si la poudre contient 5/100 d'eau, la vitesse de la combustion n'est plus que de 0m,010 par seconde. Si l'eau contenue est en proportion suffisante pour qu'on puisse ramener la poudre à l'état de galette, la vitesse de combustion n'est plus alors que 3 millimètres seulement par seconde : ces différentes vitesses ont été obtenues de la même manière que pour la poudre bien

La vitesse de combustion varie encore avec les proportions des composans, suivant que ces proportions activent et favorisent plus ou moins la formation des gaz. Voici quelques résultats qui peuvent donner une idée de ces différences de vitesse.

DÉSIGNATION DES POUDRES.	PROPORTIONS.			VITESSE DE COMBUSTION.
	SALPÊTRE.	SOUFRE.	CHARBON.	
Pulverin tassé de poudre de guerre	6	1	1	$0^m,01158$
De mine . . . . . ,	4	1 1[3	1	$0^m,01000$
Composition d'artifice . .	5	2	1	$0^m,00816$

L'expérience prouve que la proportion du soufre doit être comprise entre les limites de 8, 50 et 12, 20 pour cent pour que la vitesse de combustion soit la plus grande possible; elle prouve aussi que la proportion du soufre restant la même et celle du charbon diminuant, la vitesse de combustion diminue mais faiblement.

Enfin la trituration plus ou moins parfaite des composans, influe beaucoup aussi sur la vitesse de combustion et peut même la modifier de 1[7.

L'uniformité de la vitesse de combustion pour une même poudre, permet de connaître à un instant quelconque, la quantité de poudre qui est comburée et par suite la quantité de gaz développée.

Considérons un grain homogène que nous supposerons sphérique (fig. 28) et capable d'être comburé tout entier en un dixième de seconde. Le feu étant appliqué en un point quelconque de la surface, le grain sphérique se trouve bientôt complètement enveloppé et une première couche sphérique est comburée. Si le temps que nous considérons est le dixième du temps total qu'exige la combustion complète, l'épaisseur de la couche comburée sera telle, que le rayon de la sphère persistante après la combustion de la première couche, ne sera plus exprimé que par le nombre 9, si le rayon primitif était exprimé par le nombre 10; mais les volumes des sphères étant entr'eux comme les cubes de leurs rayons, la sphère

primitive est à celle qui persiste après la combustion de la première couche, comme 1000, cube de 10, est à 729, cube de 9. En retranchant le second nombre du premier, nous aurons la différence du volume des deux sphères, et cette différence égale à 271 sera l'expression du volume de poudre brûlée quand la première couche est comburée.

En suivant le même raisonnement, on verra que pour avoir le volume de poudre brûlée après deux dixièmes du temps total de combustion, c'est le cube de 8 qu'il faut retrancher du cube du 10, puisque le rayon de la sphère persistante alors n'est plus exprimé que par le nombre 8 et ainsi de suite.

On obtient ainsi le tableau suivant, pour les expressions des volumes de poudre comburée après chaque dixième du temps total de combustion.

0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
271	488	657	784	875	936	973	992	999	1000

On voit clairement d'après ce tableau que les quantités de gaz produits sont les plus grandes dans les premiers instans de la combustion.

Si le grain n'est plus sphérique, et qu'il soit de forme polyèdrique, circonscriptible à une sphère, les couches comburées laisseront successivement des polyèdres semblables qui seront entr'eux comme les cubes des rayons des sphères inscrites et les nombres que nous venons de trouver seront encore rigoureusement applicables.

Maintenant reprenons l'hypothèse d'un grain sphérique et appelons t' le temps total de combustion pour ce grain et t le temps de combustion pour une quantité voulue de la poudre qui le compose. R étant le rayon primitif et r le rayon de la sphère persistante après la combustion opérée pendant le temps t, nous aurons : $R :: t'-t : t'$, ou bien $\frac{r}{R}=\frac{t'-t}{t}=1-\frac{t}{t'}$, la sphère entière étant prise pour unité, nous aurons pour expression du volume de poudre brûlée $\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3$, puisque la sphère persistante a pour volume $\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3$.

Si le volume primitif est A, l'expression de la quantité de poudre brûlée en un instant quelconque devient alors,

$$A\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}.$$

On voit que si $t=o$ ce volume devient nul et si $t=t'$, tout est brûlé et l'expression se réduit à A, volume primitif.

Mais les grains de poudre de guerre ne sont pas sphériques, bien que dans les poudres qui ont voyagé les grains aient usé réciproquement leurs aspérités et soient devenus sensiblement réguliers.

Si le grain est un sphéroïde, la surface primitive étant plus considérable que la surface de la sphère qui aurait pour rayon le plus petit demi-diamètre du sphéroïde, sphère pour laquelle les calculs précédens seraient rigoureux, il en résulte simplement, que les premiers nombres du tableau exprimant les volumes comburés après chaque dixième du temps total de combustion de la sphère, dont le rayon est 10, ne sont plus rigoureusement applicables et sont un peu faibles. Voici les résultats du calcul analogue pour les grains irréguliers: 0,278—0,501 —0,669 — 0,790—0,874—0,928 — 0,966 — 989 — 0,998 — 1,000.

En comparant ces résultats à ceux obtenus pour un grain sphérique, on trouve la série suivante de différences: 0,007—0,015—0,012—0,006—0,001—0,008—0,007--0,005—0,001.

Il résulte de l'examen de ces différences, que la plus grande entre deux nombres correspondants pour la sphère et pour le sphéroïde n'est que de 15 millièmes; cette différence est négligeable sans inconvénient; nous admettrons donc les résultats obtenus pour un grain purement sphérique.

Le dixième du temps total de combustion d'un grain de poudre de guerre est à peu près le temps après lequel le projectile a parcouru la longueur de l'âme. Mais, comme en vertu de l'inertie, il ne commence à se mouvoir qu'au bout d'un certain temps et d'abord assez lentement, il en résulte, que, surtout dans les bouches à feu dont l'âme est longue, presque toute la poudre a le temps d'être comburée avant que le projectile n'ait franchi la bouche de la pièce.

Maintenant que nous nous sommes rendu compte de la manière

dont se comporte un grain de poudre isolé, considérons plusieurs grains réunis et constituant la charge d'une bouche à feu. Si l'un des grains vient à brûler, il se comporte isolément comme nous venons de le voir. Mais les gaz qui se développent avec une température suffisamment élevée pour propager la combustion, se glissent dans les interstices que les grains adjacents laissent entr'eux, les enveloppent et les enflamment de proche en proche. La vitesse de cette propagation est immense.

On a trouvé par expérience, que la température des gaz développés devait être de 2400° ; quant à la vitesse des gaz de la poudre enflammée dans un tube résistant comme les bouches à feu, Hutton a calculé qu'elle allait de 3 à 5000 pieds et Robins a trouvé par expérience qu'elle était de 7000 pieds anglais ou 2000^{m}, par seconde, à leur arrivée à la tranche de la bouche. Lorsque les gaz sont forcés de passer par les interstices des grains de poudre, les résistances qu'ils éprouvent diminuent considérablement leur vitesse d'expansion; cette vitesse varie alors avec la forme et la grosseur des grains et on doit la supposer d'au moins 10^{m} par seconde.

Il est donc important de distinguer cette vitesse qui est la vitesse d'enflammation ou celle de la propagation du feu dans les charges de poudre, de la vitesse de combustion d'un grain isolé qui n'est que de 0^{m}01233 par seconde.

Généralement la vitesse d'inflammation d'une trainée de poudre varie avec la grosseur des grains de la poudre employée, avec la quantité de cette poudre et avec la nature des corps environnants. Voici des résultats d'expérience qui constatent ces différences. La trainée considérée étant de 0,^{kil}. 16 par mètre courant, on a obtenu par seconde.

Sur un plan une vitesse de	2,^{m}40
Dans un auget	2, 48
Dans un saucisson en toile	3, 47
Le saucisson placé dans un auget . .	3, 33
L'auget étant recouvert	8, 50.

De plus, on a remarqué que la dimension des grains influe de la manière suivante ; pour les grains fins, on a obtenu sur un plan, une vitesse de 2^{m}, 50 et pour de gros grains, une vitesse de 2^{m}, 30 seulement.

La nature du charbon employé, influe elle-même; et l'on a re-

connu que le noir est plus favorable à la vitesse d'inflammation que le roux. Enfin la densité des galettes doit exercer aussi de l'influence sur cette vitesse d'inflammation des trainées.

Il est probable, que dans les bouches à feu, la forme et la grosseur des grains, influent seules sur la vitesse d'inflammation. Ainsi donc, si les grains sont ronds, il y a plus d'interstices, plus de facilité pour le passage des gaz, et par suite, les circonstances sont les plus favorables possible à l'inflammation; si les grains sont anguleux, leurs saillies peuvent s'enchevêtrer, par suite les grains se resserrent et la vitesse d'inflammation se trouve diminuée; enfin si la charge était composée de pulvérin ou poussier, la flamme ne trouverait plus de passage et la vitesse d'inflammation finirait par se confondre avec la vitesse de combustion.

Ainsi donc, comme nous l'avons dit plus haut, des deux vitesses distinctes de combustion et d'inflammation, dépendent les quantités de gaz produits, leur tension et par suite l'accélération imprimée au projectile.

ADDITION aux considérations sur les grains irréguliers, pour le calcul des quantités de poudre comburée en un instant quelconque.

Ainsi que nous l'avons vu, la formule qui représente la loi de production des gaz pendant tout le temps de la combustion d'un grain sphérique ou polyèdrique régulier, n'est pas rigoureusement applicable à un grain ordinaire de la poudre de guerre. Nous avons fait connaître les faibles différences des résultats obtenus pour les grains purement sphériques et les grains irréguliers, et d'après l'inspection de ces différences, nous avons reconnu qu'on ne commettait qu'une erreur à peu près insensible en admettant dans tous les cas les résultats obtenus pour un grain sphérique. Il est bon d'ajouter qu'il est toujours facile de déterminer le volume et par suite le rayon de la sphère du même volume que le grain ordinaire de la poudre de guerre. Il suffit en effet de compter le nombre de grains contenus dans un gramme, ce

nombre détermine immédiatement le poids du grain moyen. Ce poids étant connu il suffit d'en diviser la valeur par la densité pour avoir le volume du grain.

ADDITION aux considérations sur les dimensions des grains de poudre.

Il est évident, que plus les grains de la poudre employée sont gros, plus l'inflammation a de facilité à se propager. En effet, les interstices qui existent entre les grains sont plus grands et laissent alors un passage plus libre aux gaz enflammés, qui portent le feu aux parties les plus éloignées de la charge. Dans ce cas la vitesse d'inflammation est plus grande. D'un autre côté, chaque grain en particulier, exige plus de temps pour être complètement comburé et par suite la vitesse de combustion se trouve diminuée. Ainsi pour les charges composées de gros grains, les deux vitesses de combustion et d'inflammation éprouvent des modifications en sens inverses et si la première augmente, la deuxième diminue. On conçoit donc qu'il existe pour chaque espèce de poudre, une dimension de grain qui donne naissance dans un temps donné très court à la plus grande quantité de gaz.

De ces considérations on conclut facilement, que dans les longues charges, il y a un avantage réel à ce que les grains soient un peu gros, afin que les parties éloignées de la charge soient atteintes par les gaz le plus promptement possible. De même, dans le fusil de munition, dont la chage est généralement très-petite, la finesse du grain ne nuit pas à la quantité du gaz développé, et comme, au contraire elle active la complète combustion de la charge, on voit qu'il y a de l'avantage à ce qu'elle soit composée de grains fins. Il est donc rationel d'admettre que les grains doivent augmenter de dimension avec les dimensions des charges dans lesquelles ils doivent entrer.

Le tassement des grains doit évidemment nuire à la vitesse d'inflammation, puisqu'alors les interstices diminuent, et que les gaz enflammés ont plus d'obstacles à vaincre pour atteindre les parties les plus éloignées du point enflammé. Il est facile de s'en

convaincre en se servant d'un canon de pistolet sans lumière, dans lequel on brûle successivement des charges égales de plus en plus tassées, jusqu'à la limite, c'est-à-dire, jusqu'au point où la poudre est réduite en pulvérin. Alors, comme nous l'avons dit plus haut, la vitesse d'inflammation se confond sensiblement avec la vitesse de combustion et la charge brûle en présentant une espèce de gerbe de feu. Du reste, les considérations précédentes sur les longues charges, sont confirmées par l'expérience.

On remarque, en effet, que, dans les charges dont la longueur est égale à 4 ou 5 fois le calibre de la bouche à feu, si le feu est mis à la couche postérieure, il y a des grains des couches antérieures qui sont projetés au dehors de l'âme, avant d'avoir été atteints par les gaz.

ESPÈCES, quantités et température des différents produits obtenus par la décomposition de la poudre.

Les produits que l'on obtient par la décomposition de la poudre, varient suivant les circonstances qui accompagnent cette décomposition.

Si l'on chauffe graduellement de la poudre à l'air libre, jusqu'à élever sa température entre 230° et 240° de Réaumur, le soufre se sublime et entraîne en se dégageant une partie du charbon qui entrait dans le mélange (comme Saluces s'en est convaincu en faisant passer les produits de la volatilisation à travers des écrans de toile très-fine, sur laquelle le charbon entraîné venait se déposer). On peut même séparer ainsi tout le soufre et décomposer complètement la poudre par le feu, et le résidu peut alors être porté à une température beaucoup plus élevée, sans qu'il y ait d'explosion possible.

La volatilisation étant d'autant plus prompte que la pression du milieu dans lequel elle s'opère est moindre, il en résulte, que dans le vide, le soufre se sublime avant d'être arrivé à la température de 230° de Réaumur. Cette circonstance a été une cause d'erreur pour les observateurs qui, en opérant dans le vide la décomposition de la poudre, ont supposé que les résultats qu'ils

obtenaient étaient les mêmes que lorsque l'explosion est subite et qu'elle a lieu à l'air libre.

Dans le tir des armes à feu, la pression du milieu ambiant est toujours celle de l'atmosphère, et le temps où la température reste entre 250° et 240° est tellement court qu'il ne peut avoir une influence appréciable sur la nature des produits de la combustion.

Les anciens auteurs ont varié d'une manière très-grande dans l'évaluation des produits gazeux obtenus par la décomposition de la poudre, et cela sans doute à cause de l'imperfection de leurs moyens d'observation. Les uns ont admis que le volume des gaz permanents obtenus était égal à 200 fois le volume de la poudre brûlée, d'autres à 250 fois ce même volume. Il en est qui ont réduit ce nombre jusqu'à 12, et des chimistes de Boulogne en opérant dans l'eau, ont obtenu 50 fois le volume de la poudre brûlée, sans doute à cause de la perte des gaz dissous par l'eau. Nous admettrons les résultats des observations récentes qui méritent beaucoup plus de confiance.

Les produits obtenus par la combustion de la poudre se partagent en deux classes distinctes : les produits gazeux et les produits solides.

Les produits gazeux sont principalement de l'azote et de l'acide carbonique, quelque fois de l'oxide de carbone, un peu d'hydrogène sulfuré, d'hydrogène carboné et de gaz nitreux.

Les produits solides sont : du sulfure de potassium ou sulfate de potasse mêlé avec un peu de charbon; enfin quelques traces de soufre.

Ces produits solides sont probablement volatilisés au moment de l'explosion, en vertu de la haute température que la poudre développe, puis se trouvant en contact avec les corps environnants dont la température est beaucoup plus basse, ils se condensent sur ces corps. On remarque en effet dans les armes à chambre, de petites goutelettes de soufre condensées sur les parois de l'âme, qui constate que le soufre a été volatilisé; d'ailleurs les expériences de Rumfort établissent d'une manière certaine la complète volatilisation de tous les produits obtenus par la décomposition de la poudre. Ayant construit un canon en fer, dans lequel il a posé une charge de poudre et dont il a fermé l'orifice à l'aide d'un corps pesant, il a élevé la température de cette éprouvette à

plus de 240°, puisque son contact enflammait la poudre et il a opéré ainsi la décomposition de la charge intérieure : il a reconnu que quand il y avait explosion et quand l'éprouvette s'ouvrait, tous les produits s'échappaient. Dans le cas où elle restait fermée, en la laissant refroidir, il a constamment retrouvé tous les produits solides condensés dans l'âme et attachés aux parties les plus froides, c'est-à-dire les plus éloignées du point d'application de la chaleur.

Une dernière considération doit achever de lever tous les doutes sur le fait de la complète volatilisation des produits solides au moment de l'explosion; c'est que la bonne poudre brûle sur le papier blanc sans y laisser la moindre trace.

Il y a donc nécessité d'admettre que tous les produits quels qu'ils soient, sont gazeux ou en vapeur au moment de l'explosion.

Du reste nous trouvons une nouvelle preuve de la formation d'une certaine quantité de corps gazeux, dans les différences notables qui existent entre les évaluations des quantités de gaz permanens dégagés dans la combustion de la poudre, d'après les calculs théoriques, et les évaluations des quantités de gaz que les chimistes ont réellement obtenu; ainsi 100 grammes de poudre ne devraient donner par leur combustion que 33 ou 34 litres de gaz permanent et Gay-Lussac en a obtenu 50. Il y a donc nécessairement d'autres corps en vapeur que les gaz permanens réellement obtenus dans les 100 grammes de poudre.

Gay-Lussac a opéré la décomposition de la poudre à l'aide de l'appareil qu'il a employé pour l'analyse des substances végétales. On sait que cet appareil (fig. 29) consiste en un robinet à échancrure qui lorsqu'on le tourne porte la substance dont il est chargé et en ne laissant passer qu'elle seule, dans l'intérieur d'un vase sans communication avec l'air extérieur, et la substance tombe sur une surface élevée à une température suffisante, pour opérer sa décomposition. Les gaz obtenus sont recueillis et analysés avec l'eudiomètre.

C'est à l'aide de cette méthode, que Gay-Lussac a trouvé que la poudre de chasse de 0,9 de densité donnait 50 litres pour 100 grammes ou 450 fois son volume : de plus sur 100 parties de ces produits gazeux il a trouvé :

Acide carbonique	52, 6
Oxide de carbone	5, 0
Azote	42, 4
	100, 0

En considérant comme de l'azote les gaz qui diffèrent de l'acide carbonique et de l'oxide de carbone, il y a eu évidemment une erreur commise, puisque la quantité de gaz, dont le calcul théorique démontre l'existence dans 100 grammes de poudre, est inférieure d'un tiers à la quantité obtenue directement. Il y a donc d'autres corps gazeux non permanens qui sont demeurés confondus avec l'azote, et qui ne peuvent être que des produits solides de la décomposition de la poudre, volatilisés au moment de l'explosion.

Cette remarque est suggérée aussi par l'examen des résultats obtenus par Proust, dans ses expériences ; en brûlant différentes espèces de poudre dans la cuve à mercure, il a toujours obtenu de 40 à 42 litres de gaz pour 100 grammes de poudre, et comme il ne doit produire théoriquement que 33 ou 34 litres de gaz permanens, il en résulte que l'excès trouvé doit être attribué à la vaporisation des produits solides au moment de l'explosion.

Il est bon d'ailleurs d'observer, que tant qu'il existe dans la poudre considérée au moins

69 1/3 de salpètre
10 » de charbon
5 1/2 de soufre

la somme des produits gazeux doit très-peu varier et se trouver constamment entre 33 et 34 litres pour 100 grammes.

Voici les résultats de la décomposition théorique d'une poudre composée de

75, 0—de salpètre
10, 0—de soufre
et 15, 0—de charbon

PRODUITS SOLIDES.

Sulfate de potasse	11, 0	54, 5
Sous-carbonate de potasse	40, 0	
Charbon mélangé avec les deux substances précédentes	3, 0	
Soufre vaporisé séparément . . .	0, 5	

Report 54 50

PRODUITS GAZEUX.

Acide carbonique	28, 77	
Azote	15, 24	
Hydrogène carboné	2, 70	49, 99
Hydrogène sulfuré	2, 03	
Gaz nitreux	3, 25	
	Total	—104, 49.

La somme des produits se trouve trop forte d'un peu plus de 4 unités. Il y a donc dans cette analyse une légère erreur dont on peut voir l'origine dans l'ignorance où l'on est à l'avance de la plus ou moins grande quantité d'oxide de carbone ou d'acide carbonique, qui doit se former dans la combustion de la poudre. Il n'en résulte pas moins de l'examen des résultats que la moitié des produits se compose de gaz permanens.

Les proportions des composans de la poudre sont variables suivant les pays. Voici un tableau qui donne la composition des principales espèces de poudre en usage :

POUDRE DE GUERRE.	SALPÊTRE.	SOUFRE.	CHARBON.
Angleterre . , . . .	75,0 . , .	10,0 . . .	15,0
Berne.	76,0 . . .	10,0 . . .	14,0
Chine. . . , . .	75,7 . . .	9,9 . . .	14,4
Suède. . , . . .	75,0 . . .	9,0 . . .	16,0
Prusse	75,0 . . .	11,1/2 . . .	13,1/2
Hollande.	70,0 . . .	14,0 . . .	16,0
Autriche.	68,0 . . .	15, 1/2. . .	16, 1/2
France	75,0. . . .	12, 1/2. . .	12, 1/2

NOTA. Ces proportions ont été abandonnées récemment en Autriche et remplacées par les proportions anglaises.

POUDRE DE CHASSE.	SALPÊTRE.	SOUFRE.	CHARBON.
Angleterre de Dartfort. . . .	79,7	7,82	12,48
France	78,0	10,00	12,00

Température.

Les gaz produits dans la combustion de la poudre se trouvent élevés à une température énorme que Gay-Lussac a estimée à 1000° centigrades au moins. D'après Robins, cette température est

au moins celle du fer rouge blanc, qui est égale à 800° centigrades ou 640° de Réaumur. Saluces qui s'est occupé d'expériences sur cette température, a reconnu, que les gaz de la poudre fondent une pièce de six liards. Puis on a trouvé que le cuivre rouge ou cuivre pur qui exige pour entrer en fusion une température de 2550° n'est pas toujours fondu par la poudre, tandis que le cuivre jaune qui se fond à 2150° l'est constamment. De là, on est en droit de conclure que c'est à 2400° environ qu'il faut estimer la température à laquelle sont élevés les gaz développés par la combustion de la poudre : cependant, comme les métaux absorbent une énorme quantité de calorique avant d'entrer en fusion, il est probable que les gaz sont d'abord à une température bien plus élevée que celle qui est nécessaire pour opérer la fusion. On peut donc sans craindre de se tromper, admettre la limite de 2400°.

Tension.

Ces données sur les volumes des produits gazeux et sur la température à laquelle ils sont élevés peuvent servir à évaluer approximativement la tension dont ils sont doués dans l'explosion. Si, comme tout porte à le croire, la loi de dilation de gaz, obtenue pour toutes les températures observées, a encore lieu jusqu'à 2400° centigrades, à cette température le volume des gaz tendrait à être dix fois plus grand qu'à 0° et comme à 0° il est 450 fois plus grand que celui de la poudre, il en résulte qu'il le serait 4500 fois au moment de l'explosion.

Si donc on suppose que la loi de Mariotte, qui a été vérifiée pour l'air atmosphérique jusqu'à 27 atmosphères, a lieu à des pressions supérieures et qu'on ramène les gaz au volume primitif qu'ils occupaient dans la poudre, on aura la force élastique, qu'ils possédaient au moment de leur explosion.

Mais une partie seulement de la poudre est réduite en gaz et cette partie, en l'estimant au plus haut, constitue les 3/5 de la poudre. Si nous supposons que les résidus formant les deux autres cinquièmes de la poudre, conservent leur volume primitif, il s'en suit qu'il restera 3/5 pour l'espace occupé par les produit gazeux. A ces produits gazeux sont susceptibles d'occuper 4500 fois plus d'espace que le volume total de la poudre, ils sont donc comprimés de 5/3 × 4500 = 7500 atmosphères et par suite nous

avons 7500 atmosphères pour mesure de la tension des gaz permanens développés, lors de combustion de la poudre.

Les gaz n'augmentant de force élastique que très lentement avec les hautes températures, et ceux qui sont produits dans l'explosion de la poudre étant bien connus, une erreur de quelques centaines de degrés dans l'évaluation de la température, ne produirait que de faibles différences dans l'évaluation de la force expansive : par exemple, si au lieu de 2400° la température n'était que de 2300° la tension obtenue par la loi de dilatation ne serait plus que de 9,625 au lieu de 10, ce qui donnerait lieu à une erreur de 1/27 dans le résultat obtenu.

Les erreurs commises dans l'appréciation de la température que nous avons adoptée, n'ont donc pas une grande influence sur l'évaluation de la tension des gaz permanens, et nous pouvons considérer cette évaluation, sinon comme très approchée, du moins comme donnant une idée de la force expansive de la poudre, due aux gaz permanens qu'elle développe dans sa combustion.

Il n'en est plus de même, quand on veut tenir compte de l'influence qu'exercent les corps solides volatilisés, en vertu de la température développée et qui produisent une tension à ajouter à la tension des gaz permanens. En effet, on ne connait que très imparfaitement l'état des corps solides volatilisables, lorsqu'ils sont soumis à des températures très-élevées, et on sait seulement que la tension élastique des vapeurs, augmente très-rapidement pour de petites élévations de la température.

Considérons l'eau, par exemple, dont la poudre la mieux desséchée, contient toujours une certaine quantité ; si on admet que la loi vérifiée jusqu'à 224° centigrades par la commission de l'académie des sciences chargée en 1829 de vérifier la loi de Mariotte et de mesurer la tension de la vapeur d'eau et les températures correspondantes, continue à exister à la température de 2400°, on trouve que la force élastique de la vapeur qui à 100° est égale à 1 atmosphère et à 200° est égale à 14,85 atmosphères, deviendrait à 2400° égale à 1619000 atmosphères ; à 2300° cette force élastique n'est plus que 1313265 atmosphères, ce qui donne une différence de 305735 atmosphères. On voit que dans ce cas une erreur de 100° sur l'application de la température apporterait des erreurs énormes dans l'évaluation de la tension.

Il faut donc renoncer à estimer ainsi la tension, puisque la température développée n'est pas rigoureusement déterminée, et nous nous contenterons d'estimer cette force expansive des gaz de la poudre à 7500 atmosphères.

La poudre très-sèche, contenant toujours au moins 1|100 de son poids d'eau, quelque petite que soit cette quantité, on voit qu'il suffirait qu'elle fut vaporisée pendant toute la combustion pour produire des effets bien autrement intenses que ceux de la poudre elle-même; mais il est probable qu'elle est décomposée avant d'arriver à ces hautes températures, puisque le fer, comme on le sait, la décompose à la température rouge cerise; à la vérité il ne se trouve pas de fer dans les produits, mais il y a d'autres corps qui peuvent jouer le même rôle.

Considérations sur la force de la Poudre.

Nous avons déjà vu combien il était difficile d'évaluer, même approximativement, la force d'expansion de la poudre, au moment de son explosion. D'après les distinctions que nous avons dû nécessairement établir entre les différens produits de cette explosion, il est clair que nous devons admettre deux périodes dans l'action de la poudre. Dans la première, les vapeurs dont la formation est déterminée par la température énorme, propre au phénomène, agissent dans le même sens que les gaz permanens, dans la deuxième période, cette température qui décroit très rapidement, a baissé de telle sorte que les vapeurs soient condensées, et que les gaz permanens continuent seuls d'agir. Cependant il faut observer, que dans cette seconde période, si l'eau a été décomposée, ses composans qui sont des gaz permanens, agissent de concert avec les autres gaz permanens propres à la poudre elle même.

On sait par expérience que la force élastique des vapeurs éprouve de très-grandes variations, pour de petites différences de température; l'explosion de la poudre doit donc présenter très grandes anomalies dans les résultats obtenus suivant les ...rens employés : de là viennent les énormes différences qu'on remarque dans les évaluations données par les auteurs, pour la force absolue de la poudre. En général leurs évaluations peuvent

être regardées comme au-dessous de la réalité ; en voici les raisons : pour obtenir une valeur exacte de cette force, il faudrait que la poudre fut enfermée dans un espace d'une capacité précisément égale à son volume et que les parois en fussent élevés à la température même des gaz et des vapeurs dégagés, pour qu'il n'y eut aucune perte de force élastique provenant de la dilatation par laquelle les gaz tendent à occuper toute la capacité de l'éprouvette dans laquelle la poudre est renfermée, et ensuite de l'abaissement de température qui résulte à la fois de la dilatation que nous venons de signaler, et du contact des gaz avec des parois plus froides qu'eux. On sent que cette condition est physiquement impossible à remplir à cause de l'énorme différence qui existe entre la température de 240° à laquelle la poudre s'enflamme et la température 10 fois plus grande, des gaz qu'elle dégage. En un mot, on ne peut subitement élever les parois de l'éprouvette à la température de 2400°, et, par suite, on ne peut mesurer directement la force absolue de la poudre. Une dernière condition à laquelle il faudrait également satisfaire, ce serait d'opérer avec une éprouvette à parois assez résistantes, pour que tous les fluides élastiques eussent le temps de se produire avant la rupture de ces parois.

Rumfort est de tous les observateurs celui qui a le plus approché de la réalisation des conditions que nous avons montré devoir être remplies. Dans ses expériences, il a produit l'inflammation de la poudre en élevant une portion des parois de son éprouvette à la température nécessaire pour produire le phénomène : par suite il est arrivé à une évaluation bien supérieure à celle qu'avaient donnée les autres auteurs, puisque l'élévation de la température de l'éprouvette devait éviter en partie la perte de calorique à laquelle étaient soumis les produits dans les autres expériences où les parois n'étaient pas échauffées avant l'explosion. Nous allons donc nous arrêter aux expériences de Rumfort dont nous étudierons les résultats. Voici comment il décrit lui-même son appareil à la forme et aux dimensions duquel il n'est arrivé qu'après de longs tatonnemens (*).

(1) Bibliothèque britannique, tomes 11 et 12, et transactions philosophiques, année 1795.

» Sur un lit de maçonnerie profonde de 1^m85 en terre ,(fig. 30) » reposait un bloc de pierre dure de 1^m 32 en carré. Sur ce bloc » était placé verticalement un petit canon court de fer forgé, porté » sur un support en fonte , lequel reposait lui-même sur une ron- » delle de fer forgé , de 0^m018 d'épaisseur , établie sur le bloc de » pierre. L'orifice du petit canon avait $0^m,0065$ de diamètre et » était fermé hermétiquement par un hémisphère d'acier trempé » dont la convexité était en dessus , et dont le diamètre de » $0^m,0284$ dépassait de beaucoup l'orifice sur lequel il s'appli- » quait. C'est sur la convexité de l'hémisphère qu'on faisait » reposer le poids destiné à résister à la force élastique dé- » ployée dans le canon. L'âme était cylindrique et se ter- » minait en bas par une espèce d'appendice conique fort étroit » et fermé , qui formait en dehors une espèce de queue destinée » à entrer dans un orifice de même dimension , pratiqué dans un » boulet qu'on faisait rougir et qu'on mettait en place pour al- » lumer la poudre à l'intérieur , par l'effet de la chaleur trans- » mise au travers du métal. Une rondelle de cuir gras de semelle » battue , de la dimension précise de l'orifice du petit canon était » introduite dedans et le fermait exactement.

(Cette addition de la rondelle de cuir avait pour but de fermer assez exactement le canon pour que les gaz ne pussent en s'échappant altérer le diamètre de l'orifice et y produire des fissures qui n'eussent plus permis de calculer la force élastique des gaz produits, puisqu'avec un orifice altéré on n'eut pas eu la valeur rigoureuse de la surface suivant laquelle ces gaz opéraient leur pression. Par la suite, Rumfort interposa dans le même but entre l'orifice du canon et l'hémisphère d'acier, une nouvelle plaque de cuir mince surmontée d'une plaque de laiton.)

» Cette plaque était pressée en-dessus par la section plane de » l'hémisphère, et en-dessous par le fluide élastique. Lorsque le » fluide ne s'échappait pas en soulevant le poids comprimant , il » en sortait très peu après l'expérience. Il paraissait s'être trans- » formé en une matière grise très-dure , qui avait été réellement » dans l'état fluide ou élastique dans le moment de l'explosion , » car toutes les fois que le poids était soulevé et la rondelle de » cuir chassée hors du canon , on ne trouvait rien de solide con- » tre les parois. Cette matière s'attachait de préférence aux pa-

» rois les plus promptement refroidies. La rondelle de cuir était
» aussi couverte d'une poudre très-blanche qui, comme la pre-
» mière, passait au noir par le contact de l'air.

« Le petit canon, du meilleur fer forgé, avait 0^m070 de lon-
» gueur extérieure, autant de diamètre extérieur, sa longueur
» intérieure de 0^m0546; l'épaisseur du métal était de 0^m0518 ou
» 5 fois le diamètre du vide; il était rempli de poudre (environ
» 166 centigrammes) de la meilleure qualité, très-sèche, de 1,077
» de densité lorsqu'elle était tassée dans une mesure; la galette
» pesait 1,868 et était composée de 67, 5 de salpètre, 15, 4 de
» charbon et 17, 3 de soufre. Une pièce de 24 pesant 5670 kil. fut
» placée sur l'hémisphère. La poudre allumée par le contact du
» boulet rouge avec l'extérieur de la cavité qui la renfermait, fit
» une explosion assez violente pour faire crever l'éprouvette mal-
» gré sa force énorme, avec un bruit très-grand. L'éprouvette fut
» séparée en morceaux, lancés dans deux directions différentes et
» la pièce de 24 fut soulevée.

Rumfort essaya de déterminer la force absolue des gaz produits, d'après la valeur du poids qui les comprimait et d'après la ténacité du fer forgé: d'abord, la pression atmosphérique était comme on le sait égale à 1 $^{kil.}$,033 par centimètre carré, et cette pression étant proportionnelle aux surfaces sur lesquelles elle agit, on a pu avoir facilement la pression sur la section de l'orifice; et par la comparaison de cette pression avec la valeur du poids soulevé, on a trouvé d'abord que la tension des gaz était supérieure à 9 ou 10000 atmosphères.

La ténacité du bon fer est égale à 4231,1 fois le poids de l'atmosphère sur une même surface. Or, d'après les évaluations de Rumfort, la section de rupture de l'éprouvette était 13 fois celle de l'âme : la force développée par la poudre capable d'opérer cette rupture a donc été de $13 \times 4231,1 = 55004$ atmosphères.

Mais Rumfort ayant observé que son éprouvette avait été chauffée plusieurs fois et travaillée au marteau, a pensé que sa ténacité avait pu être altérée; en conséquence il l'a calculée directement par expérience et ne l'a trouvée que de 4211,54 atmosphères, ce qui a réduit à 54750 atmosphères, l'expression de la tension des gaz adoptée par Rumfort.

Nous remarquerons à notre tour que cet observateur a mesuré

la ténacité du fer à la température ordinaire, tandis que les parois de l'éprouvette étaient en partie portées à 240° au moins au moment de l'explosion; que de plus, l'appendice de l'éprouvette mis en contact avec le boulet rouge, a dû tendre tout de suite à s'équilibrer de température avec lui. On sait que la ténacité des corps diminue à mesure que la température augmente; ainsi le fer qui a une force de cohésion de 2400 atmosphères à la température ordinaire, n'a plus qu'une ténacité de 755 atmosphères à la température du rougebrun qui est celle de l'appendice de l'éprouvette. Il est clair que cette limite inférieure est beaucoup trop basse; si l'on prend donc la force de cohésion du fer à la température de 240°, qui est celle des parois intérieures de l'éprouvette, on a 2470 pour cette force de cohésion, obtenue par interpolation, et cette ténacité correspondra à la limite inférieure de 32000 atmosphères pour valeur de la tension des gaz. En réduisant la ténacité d'après le résultat d'expérience sur le bronze, on obtiendrait 1900 atmosphères pour la ténacité du fer à 240°; on déduirait de là une valeur minimum de 25000 atmosphères pour la force déployee par la poudre.

» Rumfort continua ses expériences avec un autre petit canon » du même calibre 0m,00633 et 0m,0764 de longueur et de diamètre extérieur et de 0m,0507 de longueur intérieure. Sa capacité était de 1g,57 centig. non compris la rondelle de cuir, et » de 1g,63 c. sans rondelle; la pression d'une atmosphère sur » l'orifice du canon était de 333g,77 c.; le vide intérieur sans la » rondelle, contenait 25 grains, 641 et 24 1/2 lorsque la rondelle » était en place. (Comme les expériences se faisaient à Munich, les poids employés étaient des grains dont 24 1/2 équivalent à 1,58 grammes et 1 grain à 0,g0647.) On varia la charge de » grain en grain depuis 1 jusqu'à 18, ces charges successives » étaient donc 0,040, 0,080, 0,120 etc. de la capacité au moment de l'explosion. On mesurait la force expansive par le poids qui reposait sur l'orifice, quand il était un peu soulevé, sans que la rondelle fût entièrement chassée; le quotient de ce poids par 333 grams 77 donnait la force en atmosphères. 85 expériences furent faites avec cet appareil, jusqu'à la charge de 18 grains ou 0,702 de la capacité, à laquelle le canon creva. »

Une précaution nouvelle fut employée par Rumfort dans cette xième série d'expériences : il entoura l'hémisphère d'acier

trempé de rubans de coton très-blanc qui, pour peu que les gaz s'échappassent, étaient noircis par le charbon entrainé. Toutes les fois que l'explosion ne soulevait pas le poids supérieur, on n'entendait qu'un bruit très sourd et analogue au craquement que fait entendre un morceau de verre en se brisant; quand les gaz pouvaient s'échapper librement le bruit produit était très-violent.

Rumfort a cherché à construire la courbe qui fait connaître les différentes tensions correspondantes aux charges prises pour abcisses. Cette courbe construite par points déterminés jusque vers la charge de 15 grains, n'a pu être continuée que par analogie pour les tensions correspondantes aux charges supérieures jusqu'à 24 grains. A l'aide du calcul, Rumfort est parvenu à déterminer l'ordonnée qui représente la tension correspondante à 24 grains de charge et a trouvé pour sa valeur 29178 atmosphères, nombre réellement compris entre les deux limites que nous avons reconnues en examinant les résultats de la première expérience. Puisque d'ailleurs la courbe de Rumfort est déterminée à l'aide de 85 expériences, on est en droit de croire qu'elle donne assez exactement les résultats réels. Si la courbe s'élevait moins rapidement et à peu près proportionnellement aux charges, on trouverait seulement 20000 atmosphères pour la tension correspondante à 24 grains. Mais cette valeur est sans doute trop-faible. Il est donc fort probable que la valeur la plus rapprochée de la vérité est de 29000 atmosphères.

Du reste cette tension doit être supérieure à celle qui se manifeste réellement dans les projectiles creux et dans les mines, à cause de la déperdition du calorique absorbé par l'élévation de température des parois qui sont ordinairement à la température ambiante, tandis que dans les expériences de Rumfort, quelques parties de son éprouvette étaient élevées au moins à 240°. De même dans les bouches à feu, après le tir le plus vif, le maximum d'élévation de température des parois intérieures n'est guère que de 80° de Réaumur, et parconséquent inférieure à celle de l'éprouvette. Si on supposait que, dans le canon, la poudre remplit exactement l'espace qui est en arrière du boulet, que ce dernier n'eut aucun mouvement avant le développement complet du plus grand effort des gaz et enfin qu'il n'y eut aucune perte de gaz par la lu-

mière et par le vent du boulet, on pourrait admettre l'évaluation de Rumfort comme limite supérieure de la tension des gaz de la poudre dans le canon ; mais on voit que ce maximun est bien loin d'être atteint dans le tir des pièces où aucune des conditions précédentes n'est remplie. En effet, la combustion de la poudre étant progressive, les premières portions du fluide élastique dégagé mettent le projectile en mouvement et agrandissent successivement l'espace dans lequel les gaz se développent, à mesure que la combustion les dégage. Leur densité n'arrive donc jamais à un terme, élevé, et, après le moment du plus grand effort, la tension diminue rapidement, parce que les nouveaux gaz produits, ne sont plus fournis en quantité suffisante pour remplir les parties de l'âme qui se trouvent en arrière du boulet dont la marche est déjà très-rapide, et pour fournir le calorique absorbé en très-grande quantité par les parois.

C'est précisément la différence énorme qui existe dans la tension des gaz d'un moment à un autre qui est la cause de la disparité que l'on remarque dans les évaluations de la force absolue de la poudre, donnée par divers auteurs. En observant les effets produits à des époques plus ou moins avancées de la combustion, ils ont dû obtenir des résultats qui ne peuvent se comparer et c'est ce qui a lieu en effet. Ainsi Robins évalue cette force à 1000 atmosphères, Hutton à 1800, d'Antoni de 1400 à 1900 et Rumfort jusqu'à 100000 atmosphères. Si on ne tenait compte que de l'effet des gaz permanens, les résultats seraient certainement les mêmes, mais l'effet des vapeurs plus ou moins habilement apprécié a dû faire varier les estimations des auteurs, comme cela est effectivement arrivé. Il y a même des observateurs qui, en ne tenant aucun compte des pertes de calorique absorbé par les parois, se sont jetés dans une très-grande cause d'erreur.

Au reste les résultats de Rumfort et de Hutton qui paraissent disparates au premier abord, puisque l'un évalue au plus bas et l'autre au plus haut, la force absolue de la poudre, sont complètement d'accord, lorsqu'ils opèrent dans des circonstances analogues, relativement aux pertes de calorique absorbé par les parois de l'âme et à la dilatation des gaz.

Cette concordance résulte de la comparaison du mode d'expériences adopté par Hutton, avec celui qu'a suivi Rumfort, et en

introduisant dans les résultats du premier les modifications qui doivent ramener ses expériences, au même ensemble de circonstances, dont on a tenu compte dans les expériences de Rumfort. Ainsi les différences trouvées entre les expressions des pressions à l'orifice par Hutton et par Rumfort pour des charges remplissant les mêmes portions de la capacité de l'éprouvette, ont été très faibles et seulement de quelques atmosphères, en tenant compte toutefois des différentes longueurs d'âmes; cet accord réel doit donc donner une pleine confiance dans les résultats fournis par la méthode de Rumfort et à l'aide desquels nous allons déterminer la relation qui existe entre la tension et la densité des gaz à chaque instant de la combustion de la poudre.

Reprenons la série des expressions de Rumfort; voici un tableau qui fournit en atmosphères la pression des gaz sur l'orifice de l'éprouvette pour les charges successives de 1 grain ou 1/25 de la capacité totale de l'éprouvette jusqu'à 18 grains.

Nombre de grains.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Pressions.	77,86.	182,3,	288,2.	382,4.	561,2.	685,6.	811,7.	1164,8.	1551,5
Nombre de grains.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.
Pressions.	1884,3.	2219,0.	2573,7.	3288,3.	4008,0.	4722,5.	7090,0.	»	10977,0

Rumfort a cherché à trouver la loi de croissance de cette tension et à la fixer au moyen d'une formule. En représentant par 1000 la capacité de l'éprouvette, par X la charge en millièmes de la capacité et par Y la tension des gaz, il a trouvé :

$$Y=1,841\ X^{1+0,0004.X}.$$

Cette formule donne effectivement les résultats avec assez de précision jusqu'à la charge de 15 grains et la courbe qu'elle représente, fournit assez exactement les tensions correspondantes à ces charges. On remarque qu'à partir de la charge de 15 grains les valeurs de Y augmentent très-rapidement, et la courbe des expériences n'est plus d'accord avec la courbe de la formule. Mais il est possible de se rendre compte de ce désaccord, en remarquant qu'à 15 grains de charge on était déjà arrivé à un point très voisin de celui où l'éprouvette n'était plus douée d'une résistance suffisante. Après 80 expériences environ il devait exister à

l'orifice des fissures qui avaient nécessairement altéré la surface de cet orifie. Ce n'était donc plus un cercle sur lequel la poudre agissait, et la pression trouvée devait être diminuée dans le rapport de l'augmentation de la surface sur laquelle elle était exercée. Ainsi donc, bien que les résultats de l'expérience et du calcul n'aient pas de concordance à partir de la charge de 15 grains, nous adopterons la formule de Rumfort. Observons toutefois que Rumfort a commis une petite erreur en prenant la capacité totale de l'éprouvette pour le volume dans lequel les gaz avaient la liberté de se dégager; en effet il diminuait le poids supérieur jusqu'à ce que la rondelle de cuir fut soulevée et non chassée complètement. La capacité totale étant 25g,641 sans la rondelle de cuir, n'était plus que de 24,50 lorsqu'elle était en place; la capacité réelle pendant l'expérience était donc une moyenne entre ces deux nombres et probablement elle peut être exprimée par 25 très-approximativement. La valeur de X doit donc être modifiée par suite de cette remarque; X augmentant, il faut diminuer son coëfficient, pour que la formule continue à représenter les résultats.

De plus, la poudre employée par Rumfort avait pour densité 1,077, celle de l'eau étant prise pour unité; c'est à cette densité de la poudre qu'était rapportée la densité des gaz, mais il est plus convenable de la rapporter aussi à la densité de l'eau, ce qui nécessite une nouvelle modification de la formule, modification que l'on peut faire de la manière suivante :

Rumfort a pris la densité en raison inverse de la contenance de l'éprouvette, qu'il a représentée par 1000, de sorte que pour une expérience où n était le nombre de grains composant la charge et X la densité des gaz correspondant, il avait :

$$X = \frac{n}{25,64} 1000.$$

Mais la densité qui entre dans la formule corrigée devait être proportionnelle à la densité même de la poudre employée, rapportée à la densité de l'eau, c'est-à-dire à 1,077 et en raison inverse de la contenance 25 de la capacité moyenne ou corrigée; en appelant ρ cette densité on aura $\rho = \frac{n}{25} 1,077$. n était encore le nombre de grains de la charge. Si n et ρ correspondent à un même

nombre de grains on pourra éliminer ce nombre n au moyen des deux relations précédentes qui donneront

$$X=\frac{25}{25,64}\cdot\frac{1000}{1,077}\cdot\rho=905.\ \rho$$

Substituant cette valeur de ρ dans la formule de Rumfort nous aurons $Y=1,841\ (905.\ \rho)^{1+0,362.\rho}$ dans laquelle ρ est la densité (rapportée à celle de l'eau) des gaz produits par la poudre dans l'espace qu'elle occupe et Y la tension correspondante exprimée en atmosphères.

Il résulte immédiatement de cette formule que les tensions croissent plus rapidement que les densités, puisque l'exposant de la puissance de ρ est plus grand que 1 ; et que si la densité est un peu grande, cet exposant devenant beaucoup plus grand que 1, la tension est très-considérable.

De cette formule on déduirait encore la tension à chaque instant si la densité des gaz était connue elle même à chaque instant. Dans les expériences où l'on a le poids de la poudre et le volume que les gaz sont susceptibles d'occuper, les volumes et la tension sont faciles à calculer à l'aide de la formule, puisque, pour avoir la densité, il suffit de diviser le poids en kilogrammes par le volume en litres: mais dans les bouches à feu il n'en est plus de même, puisque l'âme n'est pas fermée et qu'il faut un certain temps pour arriver à la réduction complète de la poudre en gaz.

Cependant, à l'aide de ce que nous avons trouvé pour l'évaluation de la quantité de poudre brûlée à chaque instant, pour un grain isolé ou pour plusieurs grains réunis et constituant une charge, nous pouvons avoir la tension des gaz aux instans successifs de la combustion.

Nous savons que le poids est égal au produit de la densité rapportée à celle de l'eau par le volume, nous avons donc:

$$\rho=\frac{P}{V}.$$

Or si un grain a pour rayon R son volume est $\frac{4}{3}\pi R^3$, et une réunion de A grains semblables donnera un volume de

$$A\ \frac{4}{3}\pi\ R^3.$$

Si δ est leur densité, leur poids sera

$$A\,\delta\,\frac{4}{3}\,\pi\,R^3.$$

t' étant toujours le temps total de la combustion d'un grain et t le temps après lequel nous voulons évaluer la tension, r étant le rayon de la sphère persistante, nous aurons pour expression du poids de la poudre non comburée après le temps t

$$A\,\delta\,\frac{4}{3}\,\pi\,r^3.$$

Le volume de la poudre brûlée sera

$$A\frac{4}{3}\pi\,(R^3 - r^3)$$ et son poids sera

$$A\,\delta\,\frac{4}{3}\pi\,(R^3 - r^3).$$

Appelant V' le volume dans lequel les gaz produits par la poudre brûlée après le temps t, peuvent se développer nous aurons :

$$p = \frac{A\,\delta\frac{4}{3}\,\pi\,(R^3 - r^3)}{V' - A\,\frac{4}{3}\,\pi\,r^3} = \frac{\delta\,A\,\frac{4}{3}\,\pi\,R^3\left(1 - \frac{r^3}{R^3}\right)}{V' - A\,\frac{4}{3}\,\pi\,r^3}.$$

Mais nous savons que la combustion étant proportionnelle au temps, on a le rapport $\frac{t}{t'} = \frac{R-r}{R}$, d'où $1 - \frac{r}{R} = \frac{t}{t'}$, d'où $\frac{r}{R} = 1 - \frac{t}{t'}$. Nous aurons donc:

$$p = \frac{\delta\,A\,\frac{4}{3}\,\pi\,R^3\left\{1 - \left(1 - \frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{V' - A\,\frac{4}{3}\pi\,r^3}.$$

Mais $r = R\left(1 - \frac{t}{t'}\right)$ donc

$$p = \frac{\delta\,A\,\frac{4}{3}\,\pi\,R^3\left\{1 - \left(1 - \frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{V' - A\,\frac{4}{3}\,\pi\,R^3\left(1 - \frac{t}{t'}\right)^3}$$

Si nous appelons V″ le volume absolu occupé par la poudre nous avons la relation $V''=A\frac{4}{3}\pi R^3$, et la formule précédente devient en y portant V″ à la place de sa valeur :

$$\rho=\frac{\delta A\frac{4}{3}\pi R^3\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{V'-V''\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3}=\frac{\delta V''\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{V'-V''\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3}.$$

Mais outre la densité réelle de la poudre, il en est une seconde à considérer qui est la densité apparente et qui s'obtient en comparant le poids d'un grand nombre de grains au volume qu'ils occupent. Soit D cette densité apparente et V‴. le volume que les grains occupent ; les densités sont en raison inverse des volumes occupés, nous aurons donc :

$$\frac{\delta}{D}=\frac{V'''}{V''}=\frac{V'''}{A\frac{4}{3}\pi R^3}. \ldots\ldots\ldots (a)$$

de là nous tirons :

$$\delta A\frac{4}{3}\pi R^3=\delta V''=DV'''.$$

Substituant cette valeur dans la formule nous avons :

$$\rho=\frac{DV'''\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{V'-V''\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3}.$$

Si nous faisons maintenant $K=\frac{V'}{V'''}$, nous avons en divisant haut et bas par V‴ :

$$\rho=\frac{D\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{K-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}}$$

Puisque nous avons $\frac{V''}{V'''}=\frac{D}{\delta}$ d'après la relation (a); nous avons donc ainsi une formule qui donne la valeur de la densité des gaz à un instant quelconque de la combustion, et par suite en reportant cette valeur de ρ dans la formule,

$$Y=1,841(905.\rho)^{1+0,362.\rho}$$

on aura la tension correspondante à un instant quelconque.

Du reste on voit que cette formule n'est applicable que dans le cas où tous les grains de la charge s'enflamment à la fois, et n'est par suite relative qu'à la vitesse de combustion de la poudre. Elle n'est donc plus applicable à une longue charge tassée comme dans les bouches à feu, c'est-à-dire, dans le cas où l'on doit tenir compte de la vitesse d'inflammation.

D'après tout ce que nous avons vu, la tension des gaz developpés par la combustion de la poudre est considérablement modifiée par les corps avec lesquels ils se trouvent en contact pendant la durée du phénomène : presque toujours cette tension est altérée, soit par l'extension des parois de l'enveloppe, soit par l'absoption du calorique que cette enveloppe, environnant les corps, enlève aux gaz, et sous ce rapport les moindres obstacles peuvent apporter des différences considérables; ainsi, par exemple, on reconnait qu'à l'air libre dans une masse de poudre soumise à l'inflammation, il y a un grand nombre de grains qui sont projetés sans être enflammés et que la combustion ne se manifeste pas instantanément partout, tandis que le plus léger obstacle au libre dégagement des gaz dans l'air, les refoule à travers les interstices des grains et produit une inflammation bien plus rapide, et par suite des effets bien plus intenses.

Une expérience que fit faire à Metz en 1826 Mr le général Pelletier montre d'une manière convaincante l'influence énorme des obstacles les plus faibles en apparence. On a étendu sur une table légère en bois, plusieurs livres de poudre auxquelles on a mis le feu et dont l'inflammation n'a produit qu'une faible dépression de la table. On a ensuite répété l'expérience avec la même quantité de poudre, mais en la recouvrant d'une feuille de papier : cette fois la table a été complètement brisée. L'obstacle le plus léger suffit donc pour rendre beaucoup plus énergique la tension des gaz de la poudre, et il est facile de se rendre compte de ce fait. Dans le cas où la poudre était brûlée à l'air libre, les gaz produits par la combustion des premiers grains se répandaient facilement dans l'atmosphère, une grande partie de leur action sur les grains voisins était par conséquent perdue. Dans le cas où la feuille de papier reposait sur la poudre, les premiers gaz rencontrant un obstacle à leur dégagement dans l'air se repandaient à travers les interstices des grains voisins et accéléraient ainsi la vitesse

d'inflammation ; d'ailleurs la cause pour laquelle les gaz ne peuvent soulever au premier instant la feuille de papier est la même que celle qui fait éprouver une véritable pression à vaincre lorsqu'on veut remuer dans l'air une feuille de papier bien tendue: ce mouvement nécessite en effet le déplacement d'une grande colonne d'air, et ce déplacement ne peut avoir lieu sans difficulté. Il demeure donc bien constaté, que l'action de la poudre diffère sensiblement, suivant l'influence des corps qui se trouvent à proximité.

Si nous considérons l'effet produit par les poudres fulminantes, nous sommes amenés à conclure que leur puissance principale est dûe à l'instantanéité de leur inflammation, plutôt qu'à la quantité de gaz qu'elles produisent. Les traînées de ces poudres sont, en effet, enflammées presque instantanément. On a chargé un mortier avec de la poudre fulminante et l'on a brisé le mortier du premier coup en n'obtenant pour le projectile qu'une portée de quelques mètres ; les gaz produits n'ont donc agi que pendant un instant très-court, ils n'ont été dégagés qu'en petite quantité et c'est à l'instantanéité de leur action que doit être attribuée toute l'énergie de cette poudre.

Mais nous n'avons pas à traiter ici des phénomènes qui accompagnent la combustion des poudres fulminantes, et nous nous occuperons exclusivement des poudres ordinaires, c'est-à-dire, de celles qui sont composées de salpêtre, de soufre et de charbon. Comme nous l'avons vu plus haut, les quantités de gaz produits varient peu entre les limites des proportions adoptées dans les différens pays pour la composition des poudres de guerre et de chasse. Nous supposerons donc que toutes les poudres produisent les mêmes quantités de gaz que celle sur laquelle Rumfort a fait ses expériences et qu'elles donnent les résultats que cet habile observateur a obtenus, en convenant toutefois que cette hypothèse n'a rien de rigoureux, et qu'il serait convenable de renouveler en France, les mêmes expériences pour toutes les poudres employées.

Nous avons donné précédemment la formule qui fournit à tous les instans de la combustion de la poudre, la tension des gaz en fonction de leur densité, et nous avons établi une seconde formule à l'aide de laquelle on peut déterminer aussi cette densité en un

instant quelconque. Dans le cas où la poudre agit dans une capacité parfaitement fermée et dont les parois sont incompressibles, les formules que nous avons trouvées sont immédiatement applicables et sans aucune difficulté ; ce cas est le plus simple de tous; nous nous en occuperons d'abord et plus tard nous examinerons l'action de la poudre renfermée dans une capacité dont les parois sont compressibles, ou dont l'une se meut, comme dans le cas des projectiles. Nous verrons alors combien la question est compliquée par la considération de ce mouvement et de l'augmentation de la capacité dans laquelle les gaz tendent à se développer. Nous allons donc considérer l'action de la poudre sur les parois invariables, comme cela a lieu dans les projectiles creux.

Projectiles creux.

Nous avons les formules $p = 1{,}841\ (905.\rho)\ 1 + 0{,}362.\rho.$

Et

$$\rho = \frac{D\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{K-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}}$$

dans lesquelles p représente la pression par centimètre carré, que les parois auront à supporter.

Prenons le cas le plus ordinaire et le plus simple, c'est-à-dire celui où les surfaces extérieures des projectiles, sont celles de deux sphères concentriques et supposons qu'il s'agisse d'abord d'un projectile entièrement fermé. Dans les pro jectiles tels que les bombes, les obus et les grenades, la capacité intérieure est assez faible pour qu'en la supposant complètement remplie de gaz, on puisse négliger sans erreur sensible le poids des couches supérieures de ce gaz. La densité des gaz est donc uniforme ; de plus leur pression est la même sur tous les points de la surface intérieure et peut être regardée comme s'exerçant normalement à cette surface.

Considérons un plan sécant dont l'intersection avec un méridien du projectile soit une corde C;(fig. 31)ce plan détermine une calotte sphérique dont la base a $\frac{C}{2}$ pour rayon. Supposons maintenant que la pression exercée par le gaz sur cette calotte, détermine un plan de rupture, et voyons qu'elle relation il existe entre la puissance et la résistance.

La somme des pressions normales à la calotte sphérique dont C est la corde, sera égale à la somme des pressions exercées sur le cercle, base de cette même calotte et si p est la tension des gaz de la poudre sur les divers points de la surface intérieure, nous aurons pour expression de l'effort exercé sur la calotte sphérique :

$$p \pi \frac{C^2}{4}.$$

Maintenant appelons T la ténacité ou force de cohésion du métal exprimée en atmosphères, comme l'est déjà la pression des gaz, ou p ; cette ténacité multipliée par la surface de rupture, nous donnera la résistance de la calotte sphérique. Cette surface devra être celle pour laquelle la résistance sera la moindre c'est-à-dire, celle qui sera la différence des deux surfaces coniques, dont le sommet est au centre de la sphère creuse, et dont les génératrices sont les rayons R et r des sphères extérieure et intérieure. (fig. 32).

Or la surface du cône dont r est la génératrice est $\pi C \times \frac{r}{2}$, celle du cône dont R est la génératrice et avec celle du petit cône dans le rapport du carré des rayons c'est-à-dire $\pi \frac{Cr}{2} \cdot \frac{R^2}{r^2}$, la différence sera donc $\pi \frac{Cr}{2} \cdot \frac{R^2}{r^2} - \pi \frac{Cr}{2} = \pi \frac{Cr}{2} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right)$.

Si la force de pression agissait normalement à la surface de rupture la résistance totale serait égale à la ténacité multipliée par cette surface de rupture, puisque dans ce cas la ténacité agirait dans la même direction que la pression ; mais cette force agit obliquement à la surface de rupture et comme nous ignorons de quelle manière agit la force de cohésion, la ténacité T de la fonte multipliée par la surface de rupture devra être augmentée d'une quantité essentiellement positive qui représentera la modification introduite dans la valeur de cette résistance par la plus ou moins grande inclinaison de la surface de rupture sur le plan de pression, et qui diminuera avec cette inclinaison jusqu'à devenir nulle à la limite, c'est-à-dire, au point où la surface de rupture coïncide avec le plan de pression.

Maintenant si nous comparons l'expression de la tension à celle de la résistance, nous aurons entre ces deux forces la relation suivante : $p \pi \frac{C^2}{4} = \frac{T \pi C r}{2} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) + \gamma$ qui se réduit à : $p = T \frac{2r}{C} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{4\gamma}{\pi C^2}$ On reconnait à l'inspection de

cette formule qu'à part la valeur de γ à mesure que C augmente la valeur de p diminue ; par conséquent pour C maximum ou égal à $2r$, p sera le plus petit possible, puisque d'ailleurs, ainsi que nous l'avons déjà dit, à cette limite $\gamma = 0$. Par suite la formule se réduit dans ce cas à

$$p = T\left(\frac{R}{r^2} - 1\right) = T\left\{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1\right\},$$

et de plus la rupture suivant un grand cercle de la sphère, est celle qui exige la moindre pression.

Ayant ainsi trouvé quelle était la condition d'équilibre entre la puissance et la résistance, il est évident que toutes les fois que nous aurons

$$p > T\left(\frac{R^2}{r^2} - 1\right)$$

il y aura rupture, et cette rupture pourra indifféremment se manifester suivant un grand cercle quelconque de la sphère creuse.

De ce qui précède on peut conclure que si, dans un obus, on introduit une petite charge, l'obus résistera ; que si on augmente cette charge, dès que la condition,

$$p > T\left(\frac{R^2}{r^2} - 1\right)$$

sera satisfaite il y aura rupture ; qu'à la plus petite charge capable de déterminer cette rupture elle se manifestera suivant de grands cercles ; qu'enfin, si la charge augmente, cette rupture pourra avoir lieu suivant de petits cercles, parce que les gaz pressés de se faire jour, agissent pendant un instant trop court pour que l'extension des parois en un point, puisse empêcher l'action des gaz de s'exercer sur tout autre point de la surface intérieure.

Il est bon d'observer d'ailleurs que nos projectiles creux à cause de la présence du vide de l'œil, doivent tendre à se rompre suivant des grands cercles passant par l'œil comme l'expérience le vérifie constamment.

On voit donc que, lorsqu'on connaît à priori la ténacité des parois d'un projectile creux, on peut calculer la valeur de la charge qui sera susceptible de le faire éclater. Mais les résultats obtenus par la formule précédente doivent être modifiés à cause de l'œil

qui d'un côté offre, il est vrai, une plus faible résistance, mais de l'autre permet à une certaine quantité des gaz produits, de s'échapper avant que la rupture n'ait été opérée. Cette quantité de gaz perdue varie dans les obus des divers calibres et dépend à la fois de la tension que doivent acquérir les gaz pour faire rompre, et de la dimension de l'œil.

L'effet de l'œil est de diminuer la résistance en augmentant la surface sur laquelle s'exerce la pression des gaz. Le centre de pression se rapproche donc de l'œil, tandis que le centre de résistance s'en éloigne. Pour les obus concentriques l'influence de l'œil est peu grande; mais si le projectile a un culot, (fig. 55) il y offre plus de résistance à l'action de la poudre, et le centre de résistance s'éloigne encore plus du centre de pression; la rupture a lieu plus facilement alors vers l'œil du projectile, puisque les deux résultantes de pression et de résistance qui tendent à s'équilibrer, ont leurs points d'application plus éloignés l'un de l'autre. En effet, dans ce cas il peut arriver que la rupture ait lieu, bien que la pression soit au-dessous de ce qu'elle serait, en prenant le résultat de la formule; car si nous considérons les momens de ces deux forces par rapport à une ligne rapprochée du culot, le bras de levier de la pression étant plus grand que celui de la résistance, il en résulte qu'il y aura rupture suivant cette ligne.

On voit que la présence des culots est désavantageuse puisqu'elle gène la formation des éclats et diminue ainsi l'effet produit par le projectile.

Quand on calcule pour les bombes la charge susceptible de produire leur rupture, à l'aide de la formule précédente, on trouve pour p une valeur supérieure à celle qu'il est nécessaire de lui donner; leur excentricité qu'il est impossible d'éviter, et sur laquelle la tolérance est assez grande, diminue la résistance. Quant aux obus concentriques la formule est sensiblement vraie.

Du reste ce qui précède repose sur l'hypothèse que la poudre se combure très-rapidement, et que les gaz qui sortent par l'œil du projectile ne s'écoulent pas en quantité suffisante pour que la tension des gaz développés puisse devenir capable de rompre le projectile.

Comme nous l'avons dit plus haut, il faut augmenter la charge donnée par la formule, d'une certaine quantité, à cause de la perte des gaz qui s'écoulent par l'œil.

Il est clair qu'il y a de l'avantage à se servir, pour faire éclater les projectiles creux, de poudres vives et à grains fins. Les anciens artilleurs avaient déjà remarqué que cette méthode de chargement était avantageuse, et presque tous la recommandent dans leurs ouvrages. Souvent on emploie pour charger les obus et les bombes, des poudres de médiocre qualité; c'est un usage qu'il serait important d'abandonner. De plus, on sait que, lorsqu'on emploie de la poudre humide, il faut remédier par une augmentation de charge à la diminution dans la vitesse de combustion que cause cette humidité : faute de tenir compte de cette circonstance, au siége de la citadelle d'Anvers, beaucoup de bombes de 10 pouces n'ont produit aucun effet et n'ont pas éclaté, bien que les charges aient été comburées entièrement.

Passons maintenant au cas où la poudre se combure et agit dans une enveloppe cylindrique à parois incompressibles et invariables. Si nous cherchons d'abord quelle est la tension des gaz capable de rompre transversalement le cylindre, il nous faut comparer la section suivant laquelle s'exercera l'action des gaz et la surface de rupture minimum qui est évidemment la surface déterminée par le prolongement même de la surface de pression; dans ce cas nous avons pour la pression

$$p\,\pi\,r^2,$$

et pour la résistance,

$$T\,\pi\,(R^2-r^2),$$

d'où pour condition d'équilibre nous déduisons

$$p=\frac{T(R^2-r^2)}{r^2}=T\left\{\left(\frac{R}{r}\right)^2-1\right\}$$

et pour condition de rupture

$$p>T\left\{\left(\frac{R}{r}\right)^2-1\right\}.$$

On voit que cette relation entre la pression et la résistance est absolument la même que celle que l'on obtient en cherchant la condition de rupture d'une sphère creuse.

Voyons maintenant ce que l'on obtient lorsque l'on veut déter-

miner la condition de rupture longitudinale ou dans le sens de l'axe. Pour l'unité de longueur du cylindre, l'effort produit par les gaz sur la demi-circonférence, est égal à la tension multipliée par la projection de cette demi-circonférence ou par le diamètre. Ainsi donc en un point de l'axe la force qui tend à briser le cylindre parallèlement à cet axe est représentée par $2\,pr$. La résistance exercée par la force de cohésion a lieu sur les deux sections dont la largeur est $R-r$ et que le plan passant par l'axe détermine dans les deux parois opposées; cette résistance est ainsi $2\,T\,(R-r)$, l'équilibre existera donc entre la pression et la résistance quand on aura :

$$2\,r\,p = 2\,T\,(R-r)$$

ou

$$p = T\left(\frac{R-r}{r}\right) = T\left\{\left(\frac{R}{r}\right) - 1\right\}.$$

Il y aura rupture quand

$$p > T\left(\frac{R}{r} - 1\right).$$

De là il est facile de conclure que la résistance d'un cylindre dans le sens longitudinal est beaucoup plus faible que sa résistance dans le sens perpendiculaire à l'axe : en effet, comparons les deux valeurs de p,

L'une est : $T\left\{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1\right\}$ l'autre : $T\left(\frac{R}{r} - 1\right)$

Or nous avons :

$$\frac{T\left\{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1\right\}}{T\left(\frac{R}{r} - 1\right)} = \frac{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left(\frac{R}{r} + 1\right)}{\frac{R}{r} - 1} = \left(\frac{R}{r} + 1\right),$$

d'après celà on voit que la résistance perpendiculaire à l'axe est plus du double de la résistance dans le sens de l'axe puisque $R > r$. De là on conclut aussi pour les bouches à feu, qu'à égalité de tension des gaz, les épaisseurs de métal doivent être proportionnelles aux calibres; puisque leur moindre résistance qui a lieu dans le sens de l'axe est représentée par l'expression :

$$T\left(\frac{R}{r} - 1\right).$$

La pratique a depuis longtems fait admettre ce pricipe de construction.

Ainsi donc les cylindres dans lesquels s'exerce l'action de la poudre, comme les canons de fusils, doivent éclater longitudinalement ou dans le sens de l'axe et c'est ce qui arrive en effet. C'est cette considération qui a motivé la construction des fusils à canons tordus et à rubans. Comme on sait que le fer résiste mieux dans le sens perpendiculaire à ses fibres , le fer qui compose le canon est tordu autour de l'axe, de manière, que la direction de ses fibres soit rendue sensiblement perpendiculaire à cet axe. C'est aussi pour la même raison que les anciennes pièces en fer forgé étaient garnies, sur leur longueur, d'anneaux de fer qui augmentaient, dans ce sens seulement, leur résistance à la rupture.

Gustave-Adolphe, pour avoir des bouches à feu extrêmement mobiles et maniables, fit fabriquer des canons en forte tole, garnis sur toute leur longueur, de cordes à plusieurs torons enroulées et fortement serrées de manière à augmenter la résistance des canons. Pour mettre ces cordes à l'abri de l'humidité, le système était recouvert de cuir et c'est ce qui a fait dire que ce Prince se servait de canons de cuir. Du reste ces bouches à feu ont résisté et il en existe encore dans le musée d'artillerie.

On peut étendre les considérations sur les effets de la poudre à la détermination des formes les plus favorables à donner aux chambres qui doivent la contenir au moment de l'explosion. Il est clair, par exemple que pour une boîte parallèlipipède, l'effet le plus grand aura lieu suivant les directions perpendiculaires aux plus grandes sections ; la différence d'action sera plus sensible encore si la boîte a pour base un losange. On voit donc, que lorsqu'on opère des démolitions à l'aide de la poudre, il est important de disposer les chambres à poudre de manière à produire le plus grand effet possible. Ainsi pour renverser des revêtements, on voit au premier coup-d'œil que la même quantité de poudre produira des effets complètement différens lors qu'étant renfermée dans une chambre cylindrique la longueur sera perpendiculaire ou parallèle au revêtement.

Ceci serait évidemment applicable aux mines, si les couches de terre étaient également compressibles au-dessus et au-dessous du fourneau.

Mais il n'en est généralement pas ainsi, et c'est cette différence de compressibilité qui produit l'entonnoir dans l'explosion d'une mine où l'effet produit à la partie inférieure est très-limité, tandis que l'effet produit au-dessus du fourneau est incomparablement plus grand. Dans une terre également compressible dans tous les sens, et parfaitement homogène, l'espace occupé par les gaz augmenterait uniformément dans tous les sens jusqu'à ce que la résistance à la compression fît équilibre à la tension des gaz; il n'y aurait arrachement que si les gaz pouvaient pénétrer jusqu'à la limite de ce milieu homogène. Mais dans les terres ordinaires qui ne sont pas homogènes et qui sont d'autant moins compressibles que les couches supérieures sont plus épaisses, le développement des gaz n'est pas uniforme : dans la partie inférieure la résistance des terres augmente uniformément et les couches inférieures continuent à se comprimer de plus en plus, jusqu'à ce que, de ce côté, la résistance à la compression soit plus grande que la tension des gaz; vers les couches supérieures, au contraire, l'action des gaz continue à se propager et arrive enfin à produire un arrachement qui permet aux gaz de s'échapper en entraînant une portion de ces couches.

On conçoit que pour les mines, si le terrain est très compacte et présente une grande ténacité, la forme du fourneau qui serait à peu près indifférente dans un terrain très compressible reprend une partie de l'influence qu'elle exerce dans les matières dures et incompressibles. Par conséquent, sous ce point de vue, la science des mines est encore assez peu avancée et demande à être sérieusement étudiée. Ainsi, par exemple, il est facile de voir que la méthode des fourneaux à double enveloppe proposés par Mouzet, qui a joui d'une très grande vogue, est tout-à-fait désavantageuse dans certains cas. Cette méthode était fondée sur ce principe, que l'air renfermé dans la plus grande enveloppe serait dilaté par la température élevée que produirait l'inflammation de la poudre, et que, par suite, son action se joindrait à celle des gaz de la poudre. Mais on n'a pas considéré que l'espace dans lequel les gaz peuvent se développer avant d'agir sur les parois de la chambre, étant plus considérable, la perte de force élastique de ces gaz, due à leur dilatation, est incomparablement plus grande que l'augmentation d'effet qui serait produit par la dilatation de l'air: cependant si le terrain était incompressible, les gaz agissant alors sur des sur-

faces plus étendues, il pourrait y avoir un certain avantage qui compenserait la diminution de tension ; mais si le terrain est facilement compressible, cette compensation n'a plus lieu et la disposition des fourneaux à la Mouzet, qui ne peut plus alors présenter que du désavantage, doit être rejetée.

Enfin on conçoit, en suivant toujours les mêmes principes, que pour le camouflet, il y ait avantage à le diriger parallèlement à la surface sur laquelle on veut agir, de même que pour l'exploitation des carrières il faut diriger les fournaux cylindriques parallèlement aux faces extérieures des blocs que l'on veut détacher.

Fusées de guerre.

Nous avons trouvé la formule qui représente, pour un instant quelconque, la tension des gaz développés pendant la combustion de la poudre, lorsqu'elle est renfermée dans une enveloppe de capacité constante et nous avons appliqué cette formule aux projectiles creux. Nous avons toutefois reconnu qu'il faut tenir compte de la perte des gaz qui se dégagent par l'œil du projectile pendant la durée du phénomène : mais comme dans ce cas il n'y a qu'une partie des gaz qui trouve une issue par l'œil, cette perte ne peut que diminuer assez faiblement la tension des gaz formés dans l'intérieur du projectile. Il n'en est plus de même quand l'écoulement est considérable, à ce point, qu'il peut acquérir une influence assez grande pour produire l'effet principal; c'est ce qui arrive dans les fusées dont nous allons étudier le mode d'action, et qui sont à la fois projectile et bouche à feu. Nous ne nous occuperons que des fusées de guerre qui sont d'ailleurs construites d'après les mêmes principes que les fusées de signaux et n'en diffèrent que par les plus fortes dimensions de leur cartouche qui est en tôle, au lieu d'être en carton; par le mode d'ajustage de leur baguette qui est adaptée dans l'axe même du cartouche au lieu de l'être sur le côté, par leur composition qui est beaucoup plus vive, et enfin par l'addition d'un chapiteau ou pot, rempli de matières incendiaires ou construit de manière à produire l'effet d'un projectile creux.

L'emploi des fusées à la guerre est beaucoup plus ancien que celui de la poudre, et quelques auteurs le font remonter jusque

vers la fin du IXe siècle. Il en est question dans des ouvrages composés au XIIe et XIIIe siècle, et à cette époque les Arabes s'en servaient contre l'armée d'expédition de Louis IX sur les côtes d'Afrique. Les Indiens en font usage depuis une époque fort reculée et s'en sont servi dans leurs guerres contre les Anglais. Ceux-ci en adoptant l'usage des fusées de guerre, n'ont donc fait que le renouveler sans le créer.

On trouve en effet, qu'on s'est servi des fusées à différentes époques pour incendier les villes. En 1379, les Padonans les employèrent contre Mestre ; en 1380 les Vénitiens lancèrent des fusées incendiaires sur Chiogia : de leur côté, les Français les ont employées en 1428 à la défense d'Orléans, en 1449 au siége de Pont-Audemer, en 1452 contre Bordeaux et en 1465 après la bataille Montlhéry. Les enveloppes se construisaient déjà en tôle à cette époque. En 1586 on s'en servait pour éclairer les environs des places assiégées, brûler les navires et mettre la cavalerie en déroute; on les lançait à l'aide de longs tubes destinés à les diriger et à augmenter leur portée. On les armait de grenades ou de balles qui devaient être lancées par l'explosion d'un pétard, enfin on les terminait par une pointe de fer taillée à *envie* qui servait à les fixer aux vaisseaux ou autres objets qu'elles devaient incendier. On voit donc que cette arme et ses diverses destinations sont loin d'être de nouvelle invention.

Dans le 17e siècle les fusées furent à peu près abandonnées, bien qu'on ait fait en 1688, à Berlin, des essais de fusées incendiaires dont les proportions de la composition fusante se rapprochaient beaucoup de celles qui, aujourd'hui, sont adoptées en France. En 1760 les expériences furent renouvelées ; en 1798 on employa les fusées contre un corsaire, mais ce ne fut qu'en 1806 que les anglais commencèrent à s'en servir avec succès parce qu'ils avaient été à même d'en apprécier les effets en 1799 au siége de Séringapatnam. Les fusées indiennes lancées sur l'armée anglaise variaient de poids de 1 à 8 livres. Leur cartouche se composait d'un bambou foré auquel s'ajustait un autre bambou plein, servant de baguette.

Le mouvement des fusées est produit par l'écoulement hors du cartouche, du fluide élastique produit par la combustion d'un mélange de salpètre, de soufre et de charbon. Il est donc important que la masse de ce fluide et la vitesse avec laquelle il est lancé

hors du cartouche soient les plus grandes possible, puisque le mouvement de ce cartouche résulte de la réaction qui a lieu sur la fusée, en vertu de la quantité de mouvement imprimée aux gaz. Cette réaction est beaucoup plus puissante pendant les premiers instants de la combustion à cause de la résistance que l'air oppose au mouvement de la fusée, résistance qui s'exerce contre la partie antérieure et dépend de la vitesse, mais cette résistance contre la tête croit rapidement avec la vitesse de translation de la fusée, tandis que la force de pulsion due au dégagement des gaz, diminue sensiblement. La fusée atteint donc bientôt un maximum de vitesse, après lequel elle se trouve soumise à des forces retardatrices, qui agissent seules lorsque tous les gaz sont écoulés.

Les gaz qui s'échappent du tube formant une masse continue, la résistance de l'air qui s'exerce sur toute l'étendue de cette masse dont la gerbe de feu, qu'on aperçoit ne forme qu'une partie, doit réagir sur l'écoulement de ces gaz, par l'orifice du tube, retarder cet écoulement et augmenter la tension. Mais à mesure que la marche de la fusée s'accélère, la différence de vitesse d'écoulement des gaz et de translation de la fusée, diminue, de sorte que cette réaction favorable à l'accélération de la vitesse s'affaiblit peu-à-peu. D'un autre côté, les gaz, en s'échappant, tendent à former un cône de dimension beaucoup plus grande que le tube de la fusée et par suite, les couches d'air en repos ou entraînées par le passage des parties antérieures et latérales du cartouche, sur lesquelles s'appuie le cône de gaz, augmentent la résistance à l'écoulement de ces gaz. C'est pour ajouter encore à cet effet latéral que l'on perce plusieurs orifices divergens à la partie postérieure du cartouche, cette divergence des orifices devant évidemment augmenter la divergence des gaz.

La force motrice réside dans la tension que les gaz exercent contre la partie antérieure du vide, tension qui produit leur écoulement et fait vaincre les résistances qu'ils rencontrent; comme dans une bouche à feu, les tranches de gaz situées dans le fond de l'âme ont à vaincre l'inertie des masses situées entre elles et l'orifice, et elles ont aussi une tension plus considérable; ce qui rend la forme conique de l'âme avantageuse.

Au commencement de la combustion, la tension des gaz ayant à mettre en mouvement des parties qui sont en repos est plus grande que quand la fusée a atteint une vitesse uniforme et il ne suffit

pas de calculer la résistance du cartouche pour le cas de cette vitesse.

Nous savons que l'action des gaz sur les parois d'un tube est en raison inverse du diamètre intérieur, puisque nous avons dans le cas d'un cylindre $Y = T \frac{(R-r)}{r}$; par suite, plus le diamètre intérieur est petit, tout en fournissant la quantité de gaz nécessaire, plus la résistance du tube est grande pour une même épaisseur $R-r$. C'est une des conditions qui ont déterminé la forme conique de l'âme des cartouches, puisque par cette forme en même temps que le diamètre intérieur est plus petit, l'épaisseur est plus considérable; par cette raison, la résistance est plus grande là où la tension des gaz l'est elle-même. D'un autre côté on a donné aux cartouches les dimensions extérieures les plus petites possible, afin que la résistance opposée par l'air au mouvement de translation, fût aussi la plus petite possible. Cette condition est remplie par la forme cylindrique allongée.

Lorsqu'on connait à priori la résistance dont est capable le cartouche que l'on emploie, on voit d'après ce qui précède qu'il faut chercher à donner aux gaz développés, une tension constante voisine du maximum qu'il peut supporter, mais toujours au-dessous de la tension qui produirait la rupture du cartouche; on obtient ainsi la réalisation des effets les plus grands possibles. On parvient à satisfaire à cette condition essentielle en donnant aux orifices par lesquels les gaz peuvent s'échapper des dimensions réglées sur la vivacité de la composition et sur la résistance du métal et déterminées par l'expérience.

Comme dans le tir des fusées qui réussissent on remarque que la gerbe de feu formée par les gaz enflammés qui se dégagent est à peu près constante pendant la plus grande partie de la combustion, on peut admettre que la masse des gaz qui s'échappent durant chaque instant ainsi que leur vitesse, est à peu près constante. Il est donc permis de supposer qu'il y a uniformité d'émission pendant la plus grande partie de phénomène; à l'aide de cette hypothèse on peut déterminer la relation qui existe entre la densité des gaz produits par la combustion des fusées, leur tension et les dimensions de leur enveloppe. Toutefois, la formule qu'on obtient ne peut-être considérée comme absolue puisque, pour y arriver, on est obligé

de partir d'une hypothèse qui n'est nullement rigoureuse et de négliger plusieurs quantités. Nous ne ferons qu'indiquer le résultat du calcul sans nous y arrêter.

Pour que la densité des gaz d'une fusée de guerre devienne constante, il faut qu'elle augmente dans les premiers instants de la combustion et atteigne rapidement un maximum, où elle se maintient. Il faut donc pour cela que la surface en combustion augmente, puisqu'à chaque instant le vide intérieur du cartouche augmente lui-même : soient donc, δ la densité des gaz, D la densité de la composition, p son poids et p' le poids de la composition qui remplirait toute la capacité, T la durée de la fusée et T' celle de l'écoulement par l'orifice on trouverait

$$\delta = \frac{Dp}{p+p'} \cdot \frac{T'-T}{T'}.$$

Cette condition justifie jusqu'à un certain point la méthode de construction des fusées Danoises pour lesquelles on a employé dans la même fusée jusqu'à huit compositions différentes pour obtenir un écoulement constant des gaz.

On voit que la densité D de la composition n'est pas constante, elle augmente à mesure que la combustion gagne les couches plus voisines du fond de l'âme ; la vitesse de combustion de ces diverses couches n'est donc pas constante ; le calcul qui tiendrait compte de toutes ces variations serait fort difficile à établir.

Du reste on a cherché à vérifier par expérience l'uniformité de vitesse des fusées de guerre et l'on a reconnu que cette uniformité avait sensiblement lieu. Pour s'en convaincre, on avait planté des jalons de 200 en 200 mètres dans la direction suivant laquelle on lançait une fusée, et les temps nécessaires à la fusée pour passer d'un jalon au suivant, mesurés avec un chronomètre, ont été à peu près constants pendant la durée de l'émission des gaz.

Les gaz ne prennent pas instantanément la vitesse due à leur tension ; pour la calculer, dans le premier moment on peut prendre la formule de Poisson pour le cas analogue de l'écoulement des fluides par un orifice très-petit. A l'aide de cette formule on trouve pour les plus petites fusées de guerre, la série suivante des vitesses d'écoulement :

Epoques à partir de l'inflammation 0",015 0",03 0",06 0",08 0",12 0,'24 0",48 . . . . . . Infini.

Vitesse d'écoulement des gaz 59^m^ 116^m^ 230^m^
355^m^ 424^m^ 650^m^ 752 à la limite 765^m^

On voit ainsi que le maximum de vitesse d'écoulement des gaz est de 765 mètres par seconde et que ce maximum est atteint environ après 3[4 de seconde. La tension augmente donc très promptement et arrive bientôt à un point qu'elle ne peut pas surpasser. On conçoit qu'il doit en être ainsi pour que les cartouches puissent résister. En effet, à cause de leur soudure, qui est assez facilement fusible, on ne doit estimer la résistance de ces cartouches qu'à environ 70 atmosphères à la température de 250°, quoiqu'à la température ordinaire elle soit de 280 atmosphères; si l'un des orifices se bouche, il en résulte immédiatement une énorme augmentation de tension qui peut s'élever assez pour surpasser la résistance dont le tube est capable, et par suite amener sa rupture.

On a cherché à mesurer la pression exercée par les gaz dans les fusées; pour cela on les a disposées de manière à empêcher tout mouvement latéral, et l'on a appliqué un dynamomètre contre la partie antérieure. On a obtenu ainsi sur l'orifice, une pression qui a varié de 220 à 260 kil.; comme la surface de l'orifice est connue, on a pu comparer cette pression à celle de l'atmosphère sur la même surface et par suite en avoir la valeur en atmosphères.

En résumé, voici les principes généraux auxquels il faut avoir égard dans la construction des fusées; d'abord il est essentiel d'obtenir une grande tension à l'intérieur en conservant de petites dimensions au diamètre de l'âme et du cartouche. La force du cartouche et par suite son poids et la masse à lancer devant augmenter avec la puissance motrice, il y aura, pour chaque substance employée, par suite de l'équilibre à établir entre la résistance du tube et la tension des gaz produits, une vitesse maximum qu'il sera important d'obtenir, mais qu'on ne pourra dépasser. Il en sera de même pour la surface des orifices qui facilitent la sortie des gaz et en même temps diminuer leur tension et leur vitesse d'écoulement.

Mais il est des conditions qu'il est avantageux de chercher à remplir dans tous les cas. La matière de l'enveloppe, par exemple, devra être la plus résistante possible à égalité de poids. La combustion de la matière fusante devra être établie de manière que la

quantité des gaz produits approche le plus possible de celle qui peut s'écouler par la surface des orifices avec la vitesse due à la tension que le cartouche peut supporter, mais ne devra jamais la dépasser. Enfin la forme de l'âme devra être telle que la quantité de gaz nécessaire soit fournie avec un diamètre intérieur minimum, surtout dans les premiers instants où l'inertie des gaz et la résistance de l'air sont les plus grands. C'est ce qui a motivé comme nous l'avons vu la forme conique de l'âme adoptée depuis longtemps, il en résulte une certaine proportion entre le diamètre et la longueur des cartouches. La forme conique de l'âme est d'ailleurs indispensable pour retirer la broche dans la fabrication.

Si, pour des cartouches de même résistance on employait des compositions douées d'une vitesse de combustion plus grande, il faudrait augmenter la surface des orifices et par suite l'action des gaz aurait moins de durée, la vitesse initiale de la fusée serait plus grande, mais les gaz éprouveraient pour se dégager moins de résistance de la part de l'air; d'un autre côté la résistance exercée par l'air sur la tête du cartouche croissant rapidement avec la vitesse, il en résulterait que la fusée serait animée d'une vitesse moindre après la combustion de la composition. Si cette combustion est moins vive, les deux forces retardatrices qui agissent sur la vitesse de la fusée, dans le cas précédent, deviennent beaucoup moins intenses et par suite on voit qu'à 600^{m}, par exemple, la fusée lancée par une composition très-vive, aura une moins grande vitesse que celle qui aura été lancée avec une composition plus lente, c'est-à-dire, avec une vitesse initiale plus petite, tandis qu'à une petite distance elle en avait une plus grande. Ainsi le maximum de vitesse des fusées à grande vitesse initiale ayant lieu vers 250^{m}, ce maximum, pour les fusées à vitesse initiale plus petite n'aurait lieu que plus loin et peut-être vers 400^{m}; ainsi dans le premier cas, on aura de plus grandes portées sur les mêmes angles et plus de vitesse ou d'effet aux petites distances: mais on en aura moins aux grandes portées, c'est-à-dire, que les enfoncemens seront moindres.

La force motrice des fusées agissant toujours dans la direction de l'axe du cartouche, il est indispensable de leur assurer une direction constante. Pour cela on place le centre de gravité du système en arrière du cartouche et le plus possible, surtout dans les pre-

miers instans de la combustion où la fusée a assez peu de vitesse pour qu'elle puisse dévier par son propre poids et tomber à la sortie du tube qui doit la diriger. La position du centre de gravité doit varier à mesure que la combustion s'effectue et après que le maximum d'écoulement des gaz se trouve atteint il est nécessaire que le centre de gravité se trouve en avant du centre de résistance du système pour le maintenir dans la direction primitive.

On a fait des essais nombreux sur la longueur à donner aux baguettes, et on a reconnu qu'avec des baguettes courtes les centres de résistance et de gravité se trouvant portés en avant du système, les fusées éprouvaient des déviations considérables.

Anciennement on plaçait la baguette sur le côté du cartouche. Cette méthode de construction tendait à faire marcher le système un peu obliquement à l'axe. Il est vrai que les gaz en s'échappant venaient frapper la baguette et amenaient le système à dévier dans l'autre sens, de sorte que la fusée allait d'un côté au moment du départ, où la pression des gaz l'emportait, et déviait ensuite de l'autre côté quand la résistance de l'air prenait le dessus. William-Congrève a remédié à cet inconvénient en plaçant la baguette dans l'axe même du cartouche. On aurait pu remplir le même but en adaptant au cartouche, deux baguettes latérales.

L'objet principal des fusées de guerre, étant d'incendier, leur utilité comme projectile sur les champs de bataille, est très restreinte et même contestée par la plus grande partie des officiers qui ont été à portée d'en observer les effets dans les différentes batailles où les Anglais s'en sont servi, et par ceux qui ont suivi les expériences. Les Anglais remplissent le chapiteau de leurs petites fusées, de balles d'un faible calibre et dont l'effet est peu meurtrier; leurs fusées de gros calibres portent des balles de 14 à la livre qui peuvent produire des effets plus grands. Malgré ces précautions, le tir de leurs fusées n'offre pas de grands résultats, et, quelques grands que soient les perfectionnements que l'on puisse introduire dans la construction des fusées, jamais elles n'approcheront de l'efficacité des boulets, des obus et des boîtes à balles, malgré l'énorme dépense qu'elles occasionnent.

Voici quels sont les prix des fusées construites actuellement à Metz.

		Poids.	*Prix.*
Fusées de 2 pouces	. . .	3 kil. 4 . .	9 f. 86 à 10 f. 00
— id. — 2po 1/2	. . .	7, 1 . .	22, 00
— id. — 3po 1/2	. . .	18, 0 . .	42, 00

L'unique avantage des fusées est de ne pas exiger de bouches à feu et de pouvoir être employées partout où des hommes peuvent parvenir. Aussi quand on les introduisit dans l'artillerie française, on les regarda comme ne devant être employées que dans la guerre de montagnes, et portées en petite quantité dans les chariots des batteries de campagne. Les affuts de rechange étant susceptibles de recevoir des tubes propres au tir des fusées, on pouvait s'en servir promptement dans le petit nombre de circonstances où il peut être avantageux de les employer. A l'organisation de l'artillerie, en 1830, on a jugé à propos d'organiser des batteries destinées exclusivement au tir des fusées, et pour lesquelles il a fallu construire un nouveau matériel.

Du reste, on ne peut nier que les très-grosses fusées ne puissent produire des effets remarquables. Ainsi à Malte, une fusée anglaise de 9 pouces pesant 240 livres et contenant 80 livres de matière fusante, pénétra dans un mur et y brisa de très-grosses pierres après une portée de plus de 2000m. A Copenhague une fusée semblable traversa le toit d'une maison, puis trois planchers, et vint se ficher dans un mur. Enfin un chapiteau contenant 13 grenades, les dispersa à 25 ou 30 pas, et dans un cercle de 140 pas de diamètre on retrouva 101 éclats.

Voici quelques tableaux qui feront connaître les principaux effets des fusées françaises.

	CALIBRE DES FUSÉES.	DISTANCES.	ENFONCEMENTS.
Enfoncements observés dans les expériences faites à Metz. (Tir contre la butte.)	2po 1|2	100m	2m50 à 3m00
	2po 0	100	2,00 à 2,30
Enfoncements observés dans les expériences faites à La Fère.	2po 0	650	1,80
	2po 1|2	650	3,20
	3po 1|2	650	3,50

Portées comparées à La Fère.

CALIBRES.	FUSÉES FRANÇAISES.	FUSÉES ANGLAISES.
2po 0	1620m	1520m
2po 1|2	1885	1890.
3po 1|2	2600	1920.

Le nombre des balles introduites dans le chapiteau peut varier suivant le calibre, de 14 à 17, enfin le temps de la combustion des fusées françaises et anglaises de 3po 1/2 comparées à La Fère a été trouvé pour les françaises de 14" et pour les anglaises de 19".

Le tableau suivant fait connaître les vitesses maximum et la distance des points où ces vitesses se manifestent, pour les fusées françaises.

CALIBRES.	VITESSES MAXIMUM.	DISTANCES.
2po 0	195m	220m.
2po 1/2	250	100m à 122.
3po 1/2	333	127m.

Voici maintenant le tableau des différentes proportions en usage pour la composition fusante.

	SALPÊTRE.	CHARBON.	SOUFRE.
A Berlin en 1688	9	3	4
En Angleterre en 1806	5	2	1
En France en 1810	6	3	1
En Danemarck	4	2	1
En Autriche	4	1	1
En Pologne	3	1	1

En France on a depuis 1810, augmenté la proportion du soufre, et diminué celle du charbon, et l'on s'est ainsi rapproché de la composition de Berlin. Voici enfin la composition de la matière incendiaire la plus efficace, et dûe au Danois Schumaker.

Nitre.	384
Soufre.	120
Charbon.	5
Antimoine	36

Ces composans sont broyés, mêlés et criblés plusieurs fois, puis le mélange est versé dans une composition fondue formée de:

Cire.	64
Poix.	8
Térébenthine	32

La matière que l'on obtient ainsi projette des flammes extrêmement vives qui sont très propres à incendier. Mais cette composition est difficile à enflammer.

Inflammation des charges de poudre dans les bouches à feu.

On a vu que, dans une masse de poudre, quand tous les grains prennent feu à la fois, on peut obtenir à chaque instant la densité des gaz formés; en conservant les mêmes notations que ci-dessus, la densité ρ des gaz de la poudre est représentée par la formule

$$\rho = \frac{D\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{K-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}}.$$

Dans l'emploi habituel de la poudre, on peut supposer que les choses se passent ainsi, parce que la poudre étant renfermée et la diffusion des gaz étant empêchée par les moindres obstacles, la vitesse de l'inflammation est tellement grande relativement à celle de combustion, qu'on peut supposer sans erreur sensible que tous les grains sont enflammés en même temps.

Quelquefois cependant il n'en est pas ainsi, soit par suite des dimensions de la charge, soit par suite de la nature de la composition des grains et de leur forme ou des interstices qu'ils laissent entre eux. Il faut alors, et on le peut, tenir compte de la vitesse d'inflammation.

Supposons en effet que dans une masse de poudre de forme quelconque, le feu soit mis en un point A, (fig. 34) l'inflammation ne commencera qu'après un temps t, dans les zônes concentriques ayant pour centre le point d'application du feu à la charge et pour rayon l'espace parcouru pendant le temps t avec la vitesse d'inflammation. La forme et les dimensions de la charge déterminant l'étendue des zônes enflammées, elles auront une grande influence sur la loi de production des gaz et par suite sur leur densité et il y aura des portions de la charge, comprises entre des zônes concentriques, les unes où l'inflammation ne sera pas encore parvenue, d'autres où la combustion sera complète, et d'autres enfin comprises entre ces deux là, dans lesquelles les grains sont enflammés et dont la combustion est plus ou moins avancée, suivant leur distance à la zône comburée. Si l'on connait la vitesse d'inflammation et celle de combustion, on pourra calculer pour chacun des élémens de cette zône la quantité de gaz formée et le volume des noyaux persistans, et par conséquent la loi de la production des

gaz sera ramenée à une question d'analyse. Dans ce calcul l'intégrale relative à l'étendue de la zône devra être limitée à la surface de la charge et celles relatives à l'avancement de la combustion des grains devront être prises relativement au point d'application du feu, depuis la distance où la combustion finit jusqu'à celle où l'inflammation commence; de sorte que si θ est le temps nécessaire pour que l'inflammation commence à la zône dont le rayon est X, la combustion du grain de cette zône ne devra être comptée qu'à partir du temps $t-\theta$, et finira quand $t = t' + \theta$. A la première époque on a pour densité des gaz de la zône $\rho = o$, à la dernière $\rho = D$, et les valeurs intermédiaires de ρ seront données par la formule

$$\rho = \frac{D\left\{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\right\}}{K-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}}.$$

dans laquelle t sera remplacé par $t-\theta$ et où l'on fera $K=1$, si la poudre remplit entièrement l'emplacement de la charge. En suite en intégrant dans les limites déterminées, on pourra avoir la densité moyenne des gaz développés.

La solution de cette question dans le cas général exige le secours d'une analyse compliquée et jette dans le calcul aux différences partielles. Mais beaucoup de cas particuliers peuvent être résolus facilement ; nous nous occuperons spécialement de celui d'une charge cylindrique placée au fond d'une pièce de canon.

Le feu étant mis à la partie postérieure de la charge, on peut supposer que toute les parties de la tranche circulaire du fond sont enflammées en même temps à cause du vide qui reste toujours derrière la gargousse, et parceque la présence de la lumière nuit un peu à la propagation des gaz dans la partie supérieure, là où le feu commençant la propagation devrait être plus avancée.

Cela posé, soit L la longueur totale de la charge et θ' le temps nécessaire pour que l'inflammation ait parcouru cette longueur L; posons $\theta' = nt'$, t' étant le temps nécessaire à la combustion d'un grain de poudre de la charge et n étant le rapport de ces deux temps, la vitesse d'inflammation sera

$$\frac{L}{\quad} = \frac{L}{nt'}$$

Et après le temps t la longueur de charge enflammée sera $\frac{Lt}{nt'}$ La longueur de la charge entièrement comburée, état qui ne commencera que quand $t > t'$, sera $(t - t')\frac{L}{nt'}$ et la tranche en combustion sera la différence de ces deux quantités ou $\frac{L}{n}$.

En prenant l'aire d'une section de la charge perpendiculaire à l'axe pour unité de surface, les volumes seront représentés simplement par les longueurs. En divisant la longueur de la tranche en combustion en un nombre h de tranches d'une petite épaisseur $\frac{L}{nh}$, les grains de chacune d'elles pourront être supposés au même degré d'avancement de combustion; la couche comburée dans les grains de ces petites tranches sera une partie du rayon primitif représentée

Pour les	1e	2e	3e	h—2.	h—1	he.	tranches
par	$\frac{h}{h}$	$\frac{h-1}{h}$	$\frac{h-2}{h}$	$\frac{3}{h}$	$\frac{2}{h}$	$\frac{1}{h}$	

Les rayons des noyaux persistans seront donc

$$0 \quad \frac{1}{h} \quad \frac{2}{h} \ldots\ldots \frac{h-3}{h}, \quad \frac{h-2}{h}, \quad \frac{h-1}{h}.$$

Et les volumes de ces noyaux seront représentés par

$$0, \left(\frac{1}{h}\right)^3, \left(\frac{2}{h}\right)^3 \ldots \left(\frac{h-3}{h}\right)^3, \left(\frac{h-2}{h}\right)^3, \left(\frac{h-1}{h}\right)^3.$$

Les portions brûlées seront alors

$$1, \quad 1-\left(\frac{1}{h}\right)^3 \quad 1-\left(\frac{2}{h}\right)^3 \ldots\ldots 1-\left(\frac{h-1}{h}\right)^3.$$

Maintenant si D est la densité gravimètrique de la poudre, le poids de chacune des h tranches sera $\frac{L}{nh}$ D, et le poids des gaz formés dans toutes les tranches sera :

$$\frac{L}{nh} D \left\{ h - \frac{1^3 + 2^3 + 3^3 + 4^3 \ldots + (h-1)^3}{h^3} \right\},$$

Or, on sait que

$$1^3 + 2^3 + 3^3 + \ldots\ldots + (h-1)^3 \text{ ou } \leq h^3 = \left\{\frac{h(h-1)}{2}\right\}^2,$$

donc, la somme des poids des gaz formés sera

$$\frac{L}{nh} D \left\{ h - \frac{1}{h^3} \left(\frac{h(h-1)}{2} \right)^2 \right\} = \frac{LD}{n} \left\{ 1 - \left(\frac{h-1}{2h} \right)^2 \right\}.$$

Si le nombre des tranches est supposé infini, $h = \frac{1}{o}$ et l'expression se réduit à $\frac{LD}{n}\left(1 - \frac{1}{4}\right) = \frac{3}{4}\frac{LD}{n}$.

La portion de la charge entièrement comburée étant, $\frac{t-t'}{n\,t'}$ L, son poids sera $\frac{t-t'}{n\,t'}$ LD, de sorte que le poids total des gaz développés sera

$$\frac{t-t'}{n\,t'} LD + \frac{3}{4}\frac{LD}{n} = \frac{LD}{nt'}\left(t - t' + \frac{3}{4}t'\right) = \frac{LD}{nt'}\left(t - \frac{t'}{4}\right).$$

Quant à l'espace qu'ils occupent, c'est le volume de la partie enflammée diminué du volume des noyaux persistans; or le volume de la charge en combustion étant $\frac{L}{n}$ son poids sera $\frac{L}{n}$ D et la partie brûlée étant $\frac{3}{4}\frac{LD}{n}$ ce qui reste est égal à $\frac{1}{4}\frac{LD}{n}$.

La densité des grains de poudre étant δ, leur volume sera $\frac{1}{4}\frac{L}{n}\frac{D}{\delta}$

Le volume libre pour l'expension des gaz sera par conséquent

$$\frac{tL}{nt'} - \frac{1}{4}\frac{L}{n}\frac{D}{\delta}.$$

Et enfin la densité moyenne des gaz à l'instant t sera

$$\rho = \frac{\frac{L}{nt'} D \left\{ t - \frac{t'}{4} \right\}}{\frac{tL}{nt'} - \frac{1}{4}\frac{L}{n}\frac{D}{\delta}} = D \frac{t - \frac{t'}{4}}{t - \frac{t'D}{4\delta}}.$$

On voit que cette densité est indépendante de la vitesse d'inflammation et de la longueur de la charge. Elle n'est applicable qu'à partir du moment où $t = t'$, et jusqu'à ce que $t = \theta - t'$, ou tant qu'il y a une partie de la charge dans laquelle la combustion cesse à la partie postérieure et commence à la partie antérieure.

Néanmoins on peut, en ne commettant qu'une erreur négligeable, commencer à appliquer la formule quand $t = \frac{1}{2}t'$, parce qu'alors pour calculer la somme des quantités de poudre brûlée au lieu de prendre la somme des cubes

$1^3+2^3+3^3 \ldots\ldots\ldots + (h-1)^3$ depuis 1 jusqu'à $(h-1)^3$ il ne faudrait la prendre que depuis $\left(\frac{h}{2}\right)^3$ jusqu'à $\left(h-1\right)^3$ ce qui fait une erreur égale à $1^3+2^3 \ldots\ldots\ldots + \left(\frac{h-1}{2}\right)^3$ laquelle n'est que la 16e partie de la somme totale, comme il est facile de le voir en remplaçant h par $\frac{h}{2}$ dans l'expression

$$\left\{\frac{h(h-1)}{2}\right\}^2.$$

Si la section de la charge au lieu d'être comme nous l'avons supposé égale à la section de l'âme de la bouche à feu, n'en était que la Ke partie, les gaz se développant librement dans un espace de K fois plus grand, la densité D devrait être réduite dans le rapport inverse de l'augmentation et l'on aurait par conséquent

$$\rho = \frac{D}{K} \cdot \frac{t - \frac{t'}{4}}{t - \frac{t' D}{4 K \delta}}$$

Nous pourrons donc déjà calculer la densité et par conséquent la tension des gaz de la poudre à chaque instant de la combustion, soit dans les circonstances où l'inflammation peut être supposée instantannée, soit dans celles où l'on doit la considérer comme progressive. Il est bon de faire voir dès maintenant l'accord de ces formules, fondées sur l'expérience seule, avec les résultats du tir, quoique pour une comparaison rigoureuse nous dussions attendre encore la connaissance de la théorie du mouvement des projectiles dans les bouches à feu.

MM. Barbier, capitaine d'artillerie et Maguin commissaire des poudres ont fait à Esquerdes pendant les années 1826, 1827 et 1828, des expériences pour reconnaître l'influence de la grosseur des grains de poudre et de leur densité sur la vitesse initiale.

Pour celà, ils ont fait des poudres qui différaient par la grosseur des grains et par la densité des galettes; le diamètre des grains était de 6mm,6. 5mm,5. 4mm, 7. 3mm, 8. 2mm, 5. (poudre à canon), 1mm,4 (poudre à mousquet) et la densité dans chaque espèce était 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1, 7. 1, 8, ce qui fesait 36 natures de grains différens; les mêmes combinaisons ont eu lieu dans quatre modes particuliers de fabrication différents entre

eux par le temps de la trituration et par celui du lissage ce qui fesait 144 poudres réellement distinctes.

Les poudres ont ensuite été éprouvées de trois manières différentes savoir : au pendule balistique, avec un canon de 4 et avec un fusil d'infanterie et enfin au mortier éprouvette.

En disposant dans un tableau, comme la table de Pytagore les résultats de ces épreuves pour chaque mode de fabrication et d'épreuve, on reconnaît que pour chaque grosseur de grains, il y a une densité qui fournit une vitesse maximum et que la série de ces maximums se présente sur une certaine courbe, quelquefois irrégulière ou en zig-zag, vu le petit nombre d'expériences (2 ou 3) faites avec chaque nature de grains.

Pour chacune de ces poudres, on a déterminé par des expériences particulières la densité gravimètrique D, la densité de la galette δ. Le temps t' nécessaire à la combustion des grains, est aussi connu par le diamètre du grain et la vitesse de combustion de $12^{mm},33$ par seconde pour la densité $\delta = 1,53$.

On peut donc à l'aide des formules précédentes calculer, à un instant quelconque t après l'inflammation et déterminer pour chaque espèce de grains, la densité δ des gaz de la poudre et par conséquent la tension correspondante pour les comparer aux résultats des expériences.

Mais ce que l'on a obtenu dans ces expériences étant des vitesses initiales, qui ne dépendent pas seulement de la densité à un instant pris arbitrairement, on doit choisir pour la valeur de t l'époque où la densité influe le plus sur la vitesse initiale, c'est-à-dire, le moment du maximum de la tension, tension qui reste alors à peu près constante pendant un intervalle de temps très marqué.

Ce temps comme nous le verrons plus loin est pour le canon de 4 de 0",07 à 0",14 ; en choisissant donc pour t une valeur quelconque entre ces deux limites et l'introduisant dans les formules avec les valeurs particulières de D, δ, t on obtient les valeurs des densités ρ; ces valeurs étant disposées en tableau comme résultats d'expériences, donneront aussi une série de maximums formant entre eux une courbe qui s'accorde avec celle des maximums des expériences, autant que les anomalies de celles-ci le permettent ; il en

est de même des combinaisons de densité et de grosseur qui donnent les résultats les plus faibles.

En opérant de la même manière pour l'épreuve au fusil et pour celle au mortier éprouvette, en prenant pour t une valeur qui soit avec la première dans le rapport des longueurs des charges, on obtient encore les mêmes relations que precédemment.

Cette comparaison montre donc déjà un accord remarquable entre les résultats du tir dans les bouches à feu et les formules que nous avons déduites directement d'expériences fondamentales et de calculs très-simples.

On voit par ces formules et par ces expériences, 1° que dans le canon de 4 pour les grandes densités, les grains les plus petits ont l'avantage, et que de toutes ces densités c'est-celle 1,5 (de la poudre de guerre) qui donne la plus grande vitesse, mais que c'est avec le grain d'un diamètre de $4^{mm},7$, tandis que celui de la poudre à canon n'est que de $2^{mm},5$; avec les faibles densités il faut au contraire employer des gros grains.

Si l'on fait la comparaison pour une charge moins grande, celle de l'éprouvette (92^{gr}), on trouve au contraire que les grains fins ont presque partout l'avantage sur les gros; c'est le grain à canon ($2^{mm},5$) qui l'emporte avec les faibles densités et le grain à mousquet ($1^{mm},4$) avec les plus grandes.

Avec une plus petite charge, celles du fusil ou $10^{grammes}$ l'avantage des grains fins ($1^{mm},4$) est plus marqué encore, puisqu'ils ont l'avantage sur tous les autres quelle que soit la densité; mais cet avantage est plus grand avec les faibles densités.

Mouvement des Projectiles dans les bouches à feu.

Nous avons vu comment on pouvait évaluer les effets de l'explosion de la poudre sur les parois qui la contenaient lorsque ces parois étaient reliées entre elles de manière à ne pas permettre au gaz d'augmenter de volume au delà d'une capacité déterminée. Ce volume étant constant, la densité du gaz est proportionnelle à la quantité de poudre brûlée et la tension qui s'en déduit, d'après les

expériences de Rumfort, donne la pression exercée contre les parois à chaque instant du phénomène.

Le problême est beaucoup plus compliqué dans le tir des bouches à feu. Il n'y a plus de fixe et d'inextensible que les parois cylindriques de l'âme qui empêchent toute expansion des gaz dans le sens perpendiculaire à l'axe. Mais le fond de l'âme et le projectile n'étant plus reliés ensemble, la pression des couches de gaz qui sont en contact avec ces parties les met en mouvement dans la direction de l'âme et en sens opposés de là naissent le recul et le mouvement du projectile.

Mais les tranches extrêmes, en se dilatant ainsi, perdent de leur tension qui devient inférieure à celle de la tranche qui les précède. Celle-ci se dilate à son tour et pousse la tranche extrême dans le sens du mouvément du mobile et ainsi de suite.

Chaque tranche de gaz tend à se dilater; les tranches extrêmes ont à vaincre non seulement l'inertie du boulet ou celle de la culasse, mais encore celle des tranches qui les en séparent; de sorte que la tension va en croissant des extréminés vers un point intermédiaire où cette tension est par conséquent au maximum. Cette dilatation des tranches se propage ainsi de tranche en tranche, jusqu'à une tranche intermédiaire, qui, par l'effet des deux mouvements opposés de la culasse et du boulet, se trouve dilatée dans le sens de l'un et de l'autre, sans être entrainée comme les autres.

Il est évident que les tranches extrêmes qui pressent le boulet et la culasse sont animées de la même vitesse que ces mobiles, puisqu'ils se suivent dans leur mouvement. Les vitesses des tranches successives diminuent donc à partir des extrémités de la masse des gaz, jusqu'à la tranche immobile dont nous avons reconnu l'existence, et dont la vitesse est nulle. Aussitôt que l'équilibre se trouve rompu dans toutes les tranches, par le mouvement de la culasse et du boulet, les densités varient de l'une à l'autre et augmentent à mesure que l'on s'approche de la tranche en repos, dont la force expansive accélère le mouvement des mobiles et celui de toutes les couches de gaz interposées.

La densité et par suite la tension des gaz varie donc non seulement à mesure que la longueur de l'âme en arrière du projectile augmente, c'est-à-dire, suivant les diverses positions du boulet ou avec le temps, mais encore dans toute l'étendue de la colonne

de gaz pour une même position du mobile, ou pour une même époque, et cela indépendamment des variations qui ont lieu par suite des quantités de gaz qui sont développés pendant tous les instans successifs de la combustion de la poudre. Voilà donc trois causes bien distinctes de différence de densité et de tension pour les gaz produits.

Pour déterminer l'influence de ces trois causes nous admettrons que toutes les parties d'une même tranche de gaz infiniment mincé et perpendiculaire à l'axe, sont dans les mêmes circonstances et que leur densité est la même au bout d'un temps quelconque t, compté à partir de l'origine du mouvement.

Soient donc :

α la distance du projectile au fond de l'âme ou à la culasse, avant le moment de l'inflammation, c'est-à-dire, la longueur de la charge ;

x la distance d'une tranche de poudre à la position primitive de la culasse, prise pour origine des coordonnées ;

t le temps écoulé depuis l'inflammation jusqu'à l'instant que l'on considère ;

z la distance de la même tranche à la culasse après un certain temps et lorsqu'une certaine partie de la poudre est réduite en gaz; z est égal a x quand $t=o$;

y la distance de la partie postérieure du projectile à la position primitive du fond de l'âme; y est égal à α, quand $t=o$;

y' la même distance pour le fond de l'âme lui-même, une fois qu'il est en mouvement ;

m la masse du boulet ;

m' la masse de la bouche à feu ;

μ la masse de la charge, $\frac{\mu}{\alpha}$ sera la masse de l'unité de longueur de la charge. Le projectile est supposé toucher la charge au moment de l'inflammation ;

p la tension des gaz d'une tranche ;

c le rayon de l'âme ;

v la vitesse du boulet } à l'instant t que l'on considère.
v' la vitesse du canon }

D'après les notations nous voyons d'abord que pour $x=o$, valeur qui correspond à la tranche au fond de l'âme, les distances de cette

tranche et du fond de l'âme à l'origine des coordonnées sont égales, c'est-à-dire, que $z=y'$.

Pour $x=\alpha$, c'est-à-dire, pour la tranche en contact avec le projectile, $z=y$.

Considérons maintenant ce qui arrive au bout du temps t; v étant la vitesse du boulet, nous avons $\frac{dy}{dt}=v$; v' étant la vitesse de la culasse, nous avons de même $\frac{dy'}{dt}=v'$. Nous allons chercher la quantité de mouvement du système, en nous servant du principe de la conservation du mouvement du centre de gravité en vertu duquel, si un système est en mouvement par suite de forces qui agissent à l'intérieur, le centre de gravité ne change pas, quels que soient le mouvement et les forces développées.

La quantité de mouvement du boulet est $m\ \frac{dy}{dt}$, celle de la pièce est $m'\ \frac{dy'}{dt}$. Cherchons celle de la charge. Nous avons vu que la masse de l'unité de longueur de la charge est égale à $\frac{\mu}{\alpha}$; considérons maintenant une tranche de la charge ayant une épaisseur infiniment petite dx: sa masse sera $\frac{\mu}{\alpha}dx$ et la vitesse $\frac{dz}{dt}$; la quantité de mouvement sera donc $\frac{dz}{dt}\frac{\mu}{\alpha}dx$. En intégrant cette expression entre les limites déterminées par la longueur de la charge, c'est-à-dire, par les valeurs de x pour les tranches extrêmes $x=o$, $x=\alpha$, nous aurons la quantité de mouvement de la charge entière ; ce sera donc

$$\int_o^\alpha \frac{dz}{dt}\frac{\mu}{\alpha}dx=\frac{\mu}{\alpha}\int_o^\alpha \frac{dz}{dt}dx.$$

La quantité de mouvement de tout le système est donc alors

$$m\ \frac{dy}{dt}+m'\ \frac{dy'}{dt}+\frac{\mu}{\alpha}\int_o^\alpha \frac{dz}{dt}dx.$$

Cette somme est égale à une quantité constante et comme dans la pratique la pièce est à l'état de repos au moment où le phénomène commence, la somme des quantités de mouvement à chaque instant doit être nulle, et nous aurons l'équation

$$m\ \frac{dy}{dt}+m'\ \frac{dy'}{dt}+\frac{\mu}{\alpha}\int_o^\alpha \frac{dz}{dt}dx=o\ .\ .\ .\ .\ (A)$$

Nous allons chercher une deuxième équation entre les quantités

v et v' ou $\frac{dy}{dt}$ et $\frac{dy'}{dt}$ Pour l'obtenir nous nous servirons du principe des forces vives, en vertu duquel la somme des forces vives d'un système en mouvement, est après un certain temps, égale à la force vive possédée au commencement du mouvement, augmentée du double de la quantité de travail développée pendant ce temps. Or la force vive d'un corps est le produit de sa masse par le carré de sa vitesse : nous aurons donc ici pour la somme des forces vives du système.

$$m\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + m'\left(\frac{dy'}{dt}\right)^2 + \frac{\mu}{\alpha}\int_o^\alpha \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 dx.$$

Cherchons maintenant quelle est la quantité de travail développé dans le tir du canon pendant le temps t.

Nous avons appelé p la pression sur l'unité de surface dans une tranche quelconque, après le temps t. La valeur de p est variable, elle est donnée en fonction de la densité par la formule $p = 1.841\,(904\,\rho)^{1+0,362.\rho}$ de Rumfort. Cette pression a lieu sur toute l'étendue de la tranche considérée et puisque c est le rayon de l'âme, la pression sur la tranche entière sera $\pi\, c^2\, p$.

Cherchons quel est le chemin parcouru par une tranche élémentaire pendant le temps t; x étant la distance au fond de l'âme d'une tranche de poudre et dx son épaisseur, z la distance de cette même tranche après un temps t, son épaisseur sera la différentielle de z pris par rapport à x seulement, c'est-à-dire, $\frac{dz}{dx}\,dx$

La différence de ces deux quantités ou $\frac{dz}{dx}\,dx - dx$ sera donc l'allongement de la tranche élémentaire dx pendant le temps t. Pendant l'élément de temps dt le chemin parcouru ou l'allongement de la tranche aura été par conséquent,

$$\frac{d\left(\frac{dz}{dx}\,dx - dx\right)}{dt} = \frac{d^2z}{dx\,dt}\,dx\,dt.$$

Ceci étant le chemin parcouru, en le multipliant par la valeur de la force ou $\pi\, c^2\, p$, nous aurons la quantité de travail élémen-

taire développée par une tranche infiniment mince dx, pendant un instant infiniment court dt, ce sera

$$\left(\frac{d^2z}{dx.\ dt}\,dx\,dt\right)\,p\,\pi\,c^2.$$

Or le travail continue à se développer pendant tout le temps t; nous aurons donc en intégrant cette expression, le travail d'une tranche pendant le temps t. Ce sera ainsi pour une tranche quelconque, $\pi\,c^2 \int_0^t p\,\frac{d^2z}{dx.dt}\,dxdt$; intégrale qui devra être prise, comme l'indique la notation, depuis $t=0$ jusqu'à $t=t'$.

Pour avoir maintenant cette quantité de travail, pour toutes les tranches ou pour la charge totale, il faudra intégrer de nouveau entre les limites fournies par les tranches extrêmes pour lesquelles $x=0$, et $x=\alpha$, nous aurons donc ainsi $\pi\,c^2\int_0^\alpha\int_0^t \frac{d^2z}{dx,dt}\,pdxdt$ pour la quantité totale de travail développé. Il faut doubler cette expression pour l'égaler à la somme des forces vives, ce qui donne:

$$2\,\pi\,c^2\int\int_0^\alpha \frac{d^2z}{dxdt}\,p\,dx\,dt = m\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + m'\left(\frac{dy'}{dt}\right)^2 + \frac{\mu}{\alpha}\int_0^\alpha\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 dx \ldots \text{(B)}.$$

On a ainsi deux équations A et B entre $\frac{dy}{dt}$ et $\frac{dy'}{dt}$ ou v et v', qui déterminent le mouvement du projectile et de la bouche à feu. Quant à la densité ρ, elle peut être exprimée en fonction de la position du projectile. En effet, l'épaisseur d'une tranche élémentaire dx étant devenue $\frac{dz}{dx}\,dx$ après le temps t, l'espace que les gaz occupent au bout du temps t est à l'espace qu'ils occuperaient si le projectile ne s'était pas déplacé comme

$$\frac{dz}{dx}\,dx - dx\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3 \frac{D}{\delta} \text{ est à } dx - dx\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3 \frac{D}{\delta}$$

A l'aide de cette proportion l'on obtient pour la valeur de ρ

$$\rho = \rho'\,\frac{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}}{\frac{dz}{dx}-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}}.$$

A mesure que le projectile se déplace, $\frac{dz}{dx}$, d'abord égal à

l'unité, augmente, et $1-\frac{t}{t'}$ diminue ; après un certain temps on peut négliger, le second terme du dénominateur, et l'on a

$$\rho=\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}\left(1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}\right)$$

Lorsque t approche d'être égal à t', on a simplement $\rho=\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$.

Substituant cette valeur de ρ dans la formule de Rumfort, nous aurons pour la pression exercée par les gaz de la tranche considérée,

$$p=1,841\left(\frac{905\rho'}{\frac{dz}{dx}}\right)^{1+0,362\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}} \quad \ldots\ldots (3).$$

Quant à ρ' il nous sera donné pour le cas où l'inflammation est instantanée, par la formule

$$\rho'=D\frac{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3}{1-\left(1-\frac{t}{t'}\right)^3\frac{D}{\delta}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4).$$

La solution de la question est donc tout-à-fait ramenée à une question d'analyse.

Plusieurs auteurs se sont occupés de la solution de cette question, en faisant diverses hypothèses dans un but de simplification : Daniel Bernouilly est le premier qui ait essayé d'appliquer le calcul aux diverses circonstances qui accompagnent le mouvement des projectiles dans l'âme des bouches à feu. Il résout complètement la question (*) en faisant toutefois abstraction de la masse des gaz et en supposant que toute la charge est à l'état gazeux à l'origine du mouvement du projectile. Il tient compte des pertes de fluide qui ont lieu par le vent du boulet et par la lumière du canon ; mais dans la supposition que l'aire de chacune de ces ouvertures est très-petite, par rapport à celle de la section de l'âme, et que la vitesse du boulet dans l'âme quoique très-grande, est très-petite par rapport à celle avec laquelle les gaz s'échappent par l'une et par l'autre des ouvertures.

(*) Hydraulique, 10e chapitre.

Benjamin Robins (*) s'est occupé ensuite de la même question. Il ne tient compte ni du vent ni de la lumière et il emploie une méthode purement géométique qui ne peut convenir que dans le cas où l'élasticité des gaz est proportionnelle à leur densité et où le projectile n'est sensiblement ébranlé qu'après la combustion totale de la poudre. Robins admet ces propositions comme des résultats d'expériences, tandis que Bernouilly ne les admet dans ses calculs que comme des hypothèses dont il reconnait ensuite l'inexactitude dans les applications aux vitesses initiales d'un boulet de 3 lancé verticalement avec diverses charges et dans deux pièces de longueurs différentes.

Euler (**) dans ses commentaires sur l'ouvrage de Robins, donne une solution analytique de la question ; il prouve d'abord qu'on peut, sans erreur sensible, négliger comme l'ont fait Bernouilly et Robins la pression de l'atmosphère, la résistance de l'air au mouvement du boulet dans l'âme et le frottement contre les parois. Il tient compte de la masse des gaz qu'une partie de la force motrice est employée à mettre en mouvement, et reconnait que l'élasticité du fluide n'est point uniforme dans tout l'espace qu'il occupe; qu'elle est moins grande contre le boulet qu'au fond de l'âme et que, par suite, la densité des gaz est variable dans toute leur étendue. Il admet, malgré cela, que cette inégalité de densité n'est pas bien sensible et qu'on peut se dispenser d'en tenir compte. Il suppose donc l'uniformité de densité des gaz dans toutes les tranches, ainsi que leur formation instantanée, bien qu'il regarde comme certain que l'inflammation de la poudre est successive. Il cherche ensuite l'influence de la lumière et du vent, en suivant la même marche que Bernouilly, et en tenant compte cependant de la masse des gaz supposés d'une densité uniforme.

Lombard dans sa traduction de Robins et d'Euler (***) s'est mieux rendu compte du phénomène et il a bien reconnu que la tension des gaz devait croître dans un rapport plus grand que la densité; mais en adoptant de sentiment une tension proportionnelle au

(*) Nouveaux principes d'artillerie de Benjamin Robins, 1742.

(**) Commentaires des nouveaux principes d'artillerie de Robins par Euler.

(***) Nouveaux principes d'artillerie par Robins, commentés par Léonard Euler traduits par Lombard. (Dijon 1783).

carré de la densité, il est tombé dans une erreur inverse, ce rapport étant plus grand que celui qui est indiqué par les résultats des expériences spéciales faites sur ce sujet. Enfin Euler ainsi que tous les autres, ne tient aucun compte du recul de la pièce.

En 1833, M. Poisson (*) a publié un mémoire de Lagrange sur le même sujet, dans lequel celui-ci suppose que la formation des gaz est instantanée et que leur tension varie comme une puissance constante de leur densité, ce qui n'est pas exact; il ne tient compte ni du vent ni de la lumière. Du reste le travail de Lagrange est très-remarquable, en ce qu'il arrive à la mise en équation de la question, sans avoir recours aux principes des forces vives, et de la conservation du mouvement du centre de gravité.

Les équations que nous avons déterminées représentent les méthodes de ces différens auteurs, lorsqu'on y établit les modifications qui résultent des hypothèses particulières à chacun de leur système.

Ainsi pour revenir au système de Bernouilly qui supposait la pièce fixe, il faut faire $m=\infty$, $\mu=\rho$, et $n=1$. n étant l'exposant de ρ dans la valeur de p donnée par la formule de Rumfort.

Euler admet aussi que n est constant, mais il ne suppose plus $\mu=\rho$.

Lagrange en supposant la formation des gaz instantanée, trouve ρ' constant et égal à D, D étant la densité gravimétrique de la poudre. De plus il suppose que la tension croît comme une puissance constante de la densité, c'est-à-dire qu'en faisant

$$1+0{,}362\,\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}=n, \text{ et } 1{,}841\,(905\,\rho')^{n}=K$$

dans la relation $p=1{,}841\left(\frac{905\,\rho'}{\frac{dz}{dx}}\right)^{1+0{,}362\,\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}}$

on a

$$p=K\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}.$$

Le double de la quantité de travail devient alors,

$$2\,\pi c^2 K\int\!\!\int_0^{x}\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}\frac{d^2z}{dx\,dt}\,dx\,dt.$$

(*) Journal de l'École Polytechnique, 21e cahier.

Cette expression pouvant se mettre sous la forme

$$2\pi c^2 K \int_0^t \int_0^x \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n} d\left(\frac{dz}{dx}\right) dx \text{ est égale à}$$

$$\frac{2\pi c^2 K}{-n+1}\int_0^x \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n+1} dx. + \text{constante}$$

Remarquant que pour $t=0$, on a $z=x$ et $\frac{dz}{dx}=1$

et par conséquent $\int_0^\alpha \left(\frac{dz}{dx}\right)^{1-n} dx = x = \alpha$, et qu'alors la quantité de travail développée est égale à zéro, on a

$$0 = \alpha + \text{const. d'où const.} = -\alpha,$$

et l'intégrale définie devient

$$\frac{2\pi c^2 K}{1-n}\left\{\int_0^\alpha \left(\frac{dz}{dx}\right)^{1-n} dx - \alpha\right\} \ldots\ldots (C)$$

C'est le résultat obtenu par Lagrange. Mais l'instantanéité de la formation des gaz ne peut-être admise. En effet, s'il en était ainsi, d'après ce que nous avons vu, les parois des bouches à feu auraient à supporter des pressions énormes, qui pourraient aller au delà de 25000 atmosphères, quelque petite que fût la charge, comme il résulte des expériences de Rumfort, dans lesquelles la plus forte charge employée n'était que de 1g66 ou $\frac{1}{3600}$ de la charge d'une pièce de 24.

Aucune bouche à feu ne pourrait résister à de pareilles tensions; l'expérience a prouvé au contraire, qu'avec les plus fortes charges admises pour le calibre de 24 la tension développée ne dépassait pas le dixième de celle qui est donnée plus haut. Les résultats fournis par cette hypothèse doivent être rejetés.

Quant à l'hypothèse que n est constant, elle approche plus de la vérité quoiqu'elle ne soit pas exacte. En effet, quand ρ' augmente $\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ diminue, et il y a en partie compensation; cette compensation est entière au moment où les gaz ont atteint la tension maximum, et dans les bouches à feu, leur produit $\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ qui ne va le plus souvent qu'à 1/3 ne descend que vers 1/10 de sorte que n varie entre 1,121 et 1,036.

Si nous admettons que n est constant nous aurons

$$p=1{,}841\ (905)^{n}\ \rho'^{n}\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}=\mathrm{K}\ \rho'^{n}\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}.$$

Alors le deuxième membre de l'équation des forces vives ou le double de la quantité de travail développée par les gaz devient

$$2\ \pi\ c^2\ \mathrm{K}\int\int_0^\alpha \rho'^{n}\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}\frac{d^2z}{dxdt}\ dxdt.$$

Cherchons maintenant à appliquer ces deux équations aux cas les plus simples. La difficulté consiste à déterminer z en fonction de x et de t pour que ces deux variables seules se rencontrent dans le système des deux équations.

Dans les bouches à feu ordinaires le poids du système de la pièce et de l'affut est beaucoup plus grand que celui du projectile, mais le poids de la charge lui est très-comparable. Il en résulte que la densité des gaz est plus grande vers la culasse que vers le projectile. Si au contraire le projectile était très-lourd et la charge faible, la vitesse des tranches serait assez faible elle-même et l'on pourrait supposer que la densité des diverses tranches est sensiblement constante ; cette densité, qui est en raison inverse du volume occupé, ne dépendrait plus alors que de la distance du projectile au fond de l'âme.

Dans ce cas $\frac{dz}{dx}$ serait proportionnel à $y-y'$, $y-y'$ est ici la distance du projectile au fond de l'âme, puisque y et y' sont les deux valeurs particulières de z, toujours de signes contraires, qui désignent le fond de l'âme et la partie postérieure du projectile; nous aurons donc

$$\frac{dz}{dx}=c\ (y-y')$$

Intégrant cette équation par rapport à x nous aurons

$$dz=c\ (y-y')\ dx \quad \text{et} \quad z=c\ (y-y')\ x+c',$$

il reste à déterminer les deux constantes; or pour $x=0$ on a $z=y'$; en substituant, on a $y'=c'$ d'où $z=c\ (y-y')\ x+y'$.

Pour $x=\alpha$, on a $z=y$; alors l'équation devient

$y = c\ (y-y')\ \alpha+y'$ d'où $c\ \alpha\ \frac{y-y'}{y-y'}=1$, donc $c=\frac{1}{\alpha}$. D'où enfin

$$z=\frac{1}{\alpha}\ (y-y')\ x+y'\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (\mathrm{D})$$

z Est ainsi exprimé en fonction de x et il resterait à substituer cette valeur dans le système des deux équations (A), (B). On voit que nous sommes entrés ainsi dans l'hypothèse d'Euler qui admet que la densité est constante dans toute l'étendue de la colonne des gaz. Mais cette hypothèse n'est convenable que quand la masse de la poudre est nulle, ou au moins tout-à-fait négligeable comme l'a admis Bernouilly.

Voici ce que deviennent les deux équations que nous avons obtenues en y substituant la valeur de z, en supposant μ négligeable et en faisant $y-y'=\theta$ et $\frac{dz}{dx}=\frac{\theta}{\alpha}$.

La première (A) devient, $mv+m'v'=o$. . . . . (A')

quant à la deuxième (B), puisque $\frac{dz}{dx}=\frac{\theta}{\alpha}$, la quantité de travail

$$\frac{2\pi c^2 K}{1-n}\left\{\int_o^\alpha \left(\frac{dz}{dx}\right)^{1-n} dx-\alpha\right\} \text{ devient}$$

$$\frac{2\pi c^2 K}{1-n}\left\{\int_o^\alpha \left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^{1-n} dx-\alpha\right\}=\frac{2\pi c^2 K\alpha}{1-n}\left\{\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^{1-n}-1\right\}$$

et l'on a

$$m\,v^2+m'\,v'^2=2\pi c^2 K\frac{\alpha}{1-n}\left\{\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^{1-n}-1\right\}. \ . \ . \ . \ . \ (B')$$

Cette solution est plus générale que celle de Bernouilly, puisqu'on y arrive sans supposer que la masse du système est infinie ou que $m=\frac{1}{o}$ On peut à l'aide de cette formule connaître la vitesse du boulet et de la bouche à feu pour chacun des points du trajet que le boulet effectue dans l'âme.

Les deux équations que nous venons de donner conviennent parfaitement au cas où la bouche à feu et le projectile sont sensés soumis à des forces attractives ou répulsives déterminées, qui agissent suivant une certaine fonction de la distance parcourue par le projectile.

Pour obtenir la valeur de t correspondante à une position quelconque du projectile, il faudrait combiner ces deux équations et on obtiendrait

$$t=\sqrt{\frac{(1-n)\,m\,m'\,\alpha^{-n}}{2\pi c^2 K(m+m')}}\int_\alpha^\theta \frac{d\theta}{\sqrt{\theta^{1-n}-\alpha^{1-n}}}.$$

Dans le cas où l'on suppose que la force accélérative qui agit sur le

projectile est constante, n devient zéro, alors la première des deux équations reste toujours $mv + m'v' = o$, mais la deuxième devient $mv^2 + m'v'^2 = 2\,\pi\, c^2\, K\, (\theta - \alpha)$.

L'expression du temps devient dans ce cas

$$t = \sqrt{\frac{2\, m\, m'\, (\theta - \alpha)}{\pi\, c^2\, K\, (m + m')}}.$$

Si l'on veut s'approcher de ce qui se passe dans la pratique, il faut supposer que μ est infiniment petit au lieu d'être nul; la solution n'est plus alors qu'approximative et on a

$$\left(m + \frac{\mu}{2}\right) v + \left(m' + \frac{\mu}{2}\right) v' = o$$

$$\left(m + \frac{\mu}{3}\right) v^2 + \left(m' + \frac{\mu}{3}\right) v'^2 + \frac{\mu}{3}\, vv' = \frac{2\,\pi\, c^2\, K\, \alpha}{1-n} \left\{ \left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^{1-n} - 1 \right\}$$

Cette dernière formule est d'autant plus exacte, que la tranche considérée est plus près de l'origine du mouvement et que μ est plus petit. Elle est donc applicable au mortier éprouvette pour lequel μ est très-petit par rapport à m, puisqu'il n'en est que le $1/320$.

Il faudrait cependant tenir compte de l'influence de la chambre, parce que la charge n'ayant pas le même diamètre que le projectile, les gaz changent de direction en s'écartant de l'axe pour se répandre sur toute la partie postérieure du projectile.

La formule ne serait donc rigoureuse que si l'éprouvette était construite sans chambre et contenait une gargousse de très-faible épaisseur et de même diamètre que le globe.

Nous avons établi les deux équations générales

$$m \frac{dy}{dt} + m' \frac{dy'}{dt} + \frac{\mu}{\alpha} \int_0^\alpha \frac{dz}{dt}\, dx = o$$

$$m \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + m' \left(\frac{dy'}{dt}\right)^2 + \frac{\mu}{\alpha} \int_0^\alpha \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 dx = 2\,\pi\, c^2 \int\!\!\int_0^\alpha p \frac{d_2 z}{dx dt}\, dx dt.$$

dans lesquelles p doit être remplacé par sa valeur tirée de la formule

$$p = 1{,}841 \left\{ 905.\ \rho \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1} \right\} 1 + 0{,}562.\ \rho \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$$

ρ représente la densité des gaz telle qu'elle serait, si les gaz se fussent développés dans l'espace en arrière du boulet, c'est-à-dire

de la charge; elle ne varie qu'avec t et elle est donnée par les formules précédentes.

Mouvement d'un projectile dans l'âme.

Nous allons appliquer ces équations au mouvement des projectiles dans les bouches à feu ordinaires.

A mesure que le projectile s'avance dans l'âme, $\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ diminue et ρ' augmente par l'augmentation des gaz formés par la combustion continue des grains de poudre; le produit $\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ éprouve donc simultanément deux variations en sens inverse, et comme la valeur de ρ' croit très-rapidement dans les premiers instans, et qu'au contraire la vitesse du projectile étant d'abord nulle, puis très faible, la variation de $\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ est d'abord très faible. Leur produit $\frac{\rho'}{\frac{dz}{dx}}$ atteint bientôt une valeur voisine du maximum et cette valeur reste stationnaire pendant un certain temps. On peut donc regarder l'exposant $1 + 0{,}362\,\frac{\rho'}{\frac{dz}{dx}}$, dans la valeur de p, comme étant à peu près constant. On trouve, en effet, que la densité des gaz, avant qu'il y ait le cinquième du rayon des grains de poudre complètement brûlé, est égale à la moitié de la densité de la poudre ce qui donne $\rho'=\frac{D}{2}$ comme dans le cas, où l'on suppose l'inflammation instantanée. Après 3/10 du temps t' nécessaire à la combustion d'un grain, la densité est 5/9 D; après 4/10 de t' elle est 3/5 D et c'est la valeur maximum à laquelle elle peut arriver.

Si l'on cherchait à représenter par une courbe les densités successives des gaz développés, on aurait une première branche très rapidement ascendante, puis sensiblement parallèle à l'axe des abscisses pendant un certain temps, puis s'abaissant rapidement vers ce même axe.

En résumé, dès les premiers instans le produit $\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ atteint sa valeur maximum, puis varie très peu. L'exposant de la densité, ou $1+0{,}362\ \rho$, dans la formule qui donne la pression, se trouve

donc très peu variable, et compris entre 1 et 1,145 pour les canons en usage; d'après cela, on peut sans forte erreur le regarder comme constant pendant une partie de la durée du phénomène, et cette hypothèse facilite singulièrement le calcul.

Voici ce que devient alors la formule de Rumfort.

$$p=K\ c'^{n}\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}.$$

Il reste à établir les relations qui existent entre les positions z d'une tranche quelconque du fluide et les variables indépendantes t et x, ou l'emplacement d'une tranche en fonction de sa position primitive et du temps; nous allons chercher ces relations.

Considérons toujours une tranche élémentaire $d\,x$ dont z est la distance au fond de l'âme; $\frac{dz}{dt}$ est la vitesse avec laquelle cette tranche se meut. L'accroissement de cette vitesse pour l'élément de temps est $\frac{d^2z}{dt^2}$; la masse de la tranche est $\pi\, c^2 D dx$, D étant la densité de la poudre; la force motrice de cette tranche est donc représentée par $\pi\ c^2\ \frac{d^2z}{dt^2} D dx$. Or cette force est due précisément à la différence des deux pressions inverses qui agissent en avant et en arrière de la tranche et qui est $\pi\ c^2\ \frac{dp}{dx}\ dx$. Nous aurons donc en égalant les deux expressions de la force motrice l'équation du mouvement du gaz qui sera,

$$\frac{d^2z}{dt^2}\ D dx = -\frac{dp}{dx} dx. \ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (1)$$

Le deuxième membre se trouve affecté du signe —, parceque la différentielle de p est de signe contraire à celle de x, vu que, quand la deuxième augmente, la première diminue.

Cherchons maintenant les équations du mouvement du projectile et de la bouche à feu. La force motrice du projetile est $m\ \frac{d^2y}{dt^2}$. Il faut la comparer à l'action des gaz sur un grand cercle du projectile: p'' étant la pression exercée sur le boulet; l'action des gaz sera $p''\pi c^2$, par suite nous aurons

$$m\ \frac{d^2y}{dt^2} = \pi\ c^2\ p''. \ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (2)$$

Nous obtiendrons de même pour la bouche à feu, au signe près, à cause du sens inverse du mouvement

$$m' \frac{d^2y'}{dt^2} = -\pi \ c^2 \ p' . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (3)$$

p' et p'' sont évidemment ici ce que devient p quand $x=\beta$ et quand $x=\alpha$, relation pour lesquelles nous avons vu que $z=y'$ et $z=y$; remplaçons d'abord p par sa valeur dans l'équation

$$\frac{d^2z}{dt} \mathrm{D} \ dx = -\frac{dp}{dx} dx \ ;$$

or nous avons,

$$p = \mathrm{K} \ \rho'^n \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}$$

d'où

$$dp = \mathrm{K} \ \rho'^n \ d \left\{ \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n} \right\},$$

mais,

$$d \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n} = -n \ \frac{d^2z}{dx^2} \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n-1} dx$$

l'équation (1) devient donc,

$$\frac{d^2z}{dt^2} \mathrm{D} = n \ \mathrm{K} \ \rho'^n \ \frac{d^2z}{dx^2} \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n-1} . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (4)$$

Pour la deuxième, comme $z=y$ dans le cas où $x=\alpha$, nous aurons

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = \pi \ c^2 \ \mathrm{K} \ \rho'^n \left(\frac{dy}{dx}\right)^{-n} . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (5)$$

Par la même raison, l'équation (3) deviendra en remplaçant z par sa valeur y' correspondante à $x=\beta$

$$m' \frac{d^2y'}{dt^2} = -\pi \ c^2 \ \mathrm{K} \ \rho'^n \left(\frac{dy'}{dx}\right)^{-n} . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (6)$$

Les trois équations (4) (5) (6) savoir :

$$\frac{d^2z}{dt^2} \mathrm{D} = n \ \mathrm{K} \ \rho'^n \ \frac{d^2z}{dx^2} \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n-1}, \ m \frac{d^2y}{dt^2} = \pi \ c^2 \ \mathrm{K} \ \rho'^n \left(\frac{dy}{dx}\right)^{-n},$$

$$m' \frac{d^2y'}{dt^2} = -\pi \ c^2 \ \mathrm{K} \ \rho'^n \left(\frac{dy'}{dx}\right)^{-n}.$$

sont des relations qui existent dans le mouvement de tout le système.

Il y a une méthode fort simple à l'aide de laquelle on peut transformer les premiers membres de ces trois équations de manière à

reconnaître immédiatement l'analogie qui existe entre eux, et à introduire comme variable des premiers membres la variable qui se trouve dans les seconds.

μ étant la masse de la charge nous avons $\mu = \pi\, c^2 \alpha\, D$; si nous divisons les deux membres de l'équation (4) par μ en faisant passer le facteur K $\rho'^n \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-n}$ dans le premier membre, nous aurons

$$\frac{D}{\mu K \rho'^n} \frac{d^2y}{dt^2} \left(\frac{dz}{dx}\right)^n = \frac{n}{\mu} \frac{d^2z}{dx^2} \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1} \quad \ldots\ldots \quad (7).$$

L'équation (5), en divisant les deux membres par m et par μ, puis en faisant passer D dans le premier membre, devient de même

$$\frac{D}{\mu K \rho'^n} \frac{d^2y}{dt^2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^n = \frac{1}{m\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

L'équation (6) donne par la même transformation

$$\frac{D}{\mu K \rho'^n} \frac{d^2y'}{dt^2} \left(\frac{dy'}{dx}\right)^n = -\frac{1}{m'\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Il faut remarquer, que les trois premiers membres des équations (7) (8) (9) sont identiques à la valeur près de x, qui fait changer la valeur de z et que l'équation (8) est relative à la tranche particulière pour laquelle $x=\alpha$, l'équation (9) à la tranche pour laquelle $x=0$ l'équation (7) est générale.

Les premiers membres de ces équations se confondent donc, lorsqu'on y fait les hypothèses que nous venons d'établir; par suite, en égalant le deuxième membre de l'équation (7) tour à tour aux deuxièmes membres des équations (8) et (9), nous aurons substitué au système de ces nouvelles équations (7) (8) et (9), deux nouvelles équations dans lesquelles il y aura séparation des variables et qu'il deviendra possible d'intégrer. Nous aurons alors les équations :

$$\frac{n}{\mu} \frac{d^2z}{dx^2} \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1} = \frac{1}{m\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

$$\frac{n}{\mu} \frac{d^2z}{dx^2} \left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1} = -\frac{1}{m\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

qui doivent être satisfaites pour toutes les valeurs possibles de z.

Nous avons déjà déterminé plus haut une valeur générale de z,

en supposant que toutes les couches de gaz ont la même densité et que cette densité ne varie qu'avec le volume occupé par le gaz; cette valeur de z était $z = \frac{y-y'}{\alpha}x + y'$. Il est facile de voir qu'elle ne satisfait pas généralement: car si nous différentions par rapport à x nous aurons,

$$\frac{dz}{dx} = \frac{y-y'}{\alpha}$$

d'où

$$\frac{d^2z}{dx^2} = 0$$

Nous aurons donc $\frac{d^2z}{dx^2} = 0$ et par suite le 1er membre de nos deux équations (10) et (11) serait toujours nul. Pour satisfaire à cette condition il faudrait que m ou α fût infini, ce qui ne peut pas être dans le cas que nous considérons ; ou bien il faudrait que μ fût égal à zéro, ce qui revient à la condition que nous avons trouvée plus haut.

Cette valeur de z ne satisfait donc pas à la question ; ce qu'il faut trouver, est une certaine fonction de x, la plus simple possible, à laquelle on puisse égaler le premier membre des équations (10) et (11) et qui se réduise à $\frac{1}{m\alpha}$ pour $x=\alpha$ et à $-\frac{1}{m'\alpha}$ pour $x=0$. Cette fonction la plus simple est $\frac{x-\alpha}{m'\alpha^2} + \frac{x}{m\alpha^2}$. Pour $x=\alpha$ elle se réduit en effet à $\frac{1}{m\alpha}$ et à $-\frac{1}{m'\alpha}$ pour $x=0$.

On pourrait aussi au lieu de cette fonction introduire une fonction du temps. Mais alors il faudrait que cette fonction fût déterminée par des conditions nouvelles et arbitraires ; comme par exemple, que les gaz eussent une certaine densité au bout d'un certain temps.

Nous n'entrerons pas dans le détail de ces hypothèses, et nous adopterons la relation que nous avons déterminée, ce qui nous donnera :

$$\frac{n}{\mu}\frac{d^2z}{dx^2}\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1} = \frac{x-\alpha}{m'\alpha^2} + \frac{x}{m\alpha^2} = \frac{m(x-\alpha)+m'x}{mm'\alpha^2} = \frac{(m+m')x-m\alpha}{mm'\alpha^2} \quad . \; . \; (12)$$

Remarquons maintenant qu'en général

$$d\log. u = \frac{du}{u},$$

on aura

$$\frac{d^2 z}{dx^2}\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}=\frac{\frac{d^2 z}{dx^2}}{\frac{dz}{dx}}=\frac{d\ \log \frac{dz}{dx}}{dx}.$$

Par suite, nous pouvons intégrer l'équation (12) qui a pour premier membre $\frac{n}{\mu}\frac{d \log. \frac{dr}{dx}}{dx}$; opérant cette première intégration nous aurons.

$$\log\frac{dz}{dx}=\frac{\mu}{2n}\left(\frac{(m+m') x^2-2 m \alpha x}{m m' \alpha^2}\right)+\log.\ \text{constant}.$$

En effet

$$\int\left\{\frac{x-\alpha}{m' \alpha^2}\, dx+\frac{xdx}{m\alpha^2}\right\}=\frac{x^2}{2\alpha^2 m'}-\frac{\alpha x}{m'\alpha^2}+\frac{x^2}{2m\alpha^2};$$

réduisant tout au même dénominateur cette expression deviendra $\frac{m x^2-2 m \alpha x+m' x^2}{2 m m' \alpha^2}=\frac{(m+m') x^2-2 m \alpha x}{2 m m' \alpha^2}$, abstraction faite de la constante. Maintenant, en passant des logarithmes aux nombres, nous aurons

$$\frac{dz}{dx}=e^{\frac{\mu}{2n}\frac{(m+m') x^2-2 m \alpha x}{m m' \alpha^2}+\log. c}$$

ou

$$\frac{dz}{dx}=c.\, e^{\frac{\mu}{2n}\frac{(m+m') x^2-2 m \alpha x}{m m' \alpha^2}},$$

parcequ'en général $a=e^{\log a}$

On ne peut pas intégrer les deux membres de cette équation sous cette nouvelle forme, mais on sait qu'on peut développer une puissance quelconque de e base du système népérien en fonction de son exposant et que généralement on a :

$$e^{a}=1+\frac{a}{1}+\frac{a^2}{1.2}+\frac{a^3}{1.2.3}+\&^a$$

En employant ce mode de développement nous aurons

$$\frac{dz}{dx}=c\left\{1+\frac{\mu}{2n}\left\{\frac{(m+m')\,x^2-2\,m\,\alpha\,x}{m\,m'\alpha^2}\right\}+\frac{\mu^2}{1.\,2.\,2^2\,n^2}\left\{\frac{(m+m')\,x^2-2m\alpha x}{m\,m'\,\alpha^2}\right\}^2+\&c\right\}$$

développement dont la loi de formation est facile à suivre. Sous cette nouvelle forme l'intègration de l'équation devient possible et donne en multipliant les deux membres par dx

$$dz=cdx\left\{1+\frac{\mu}{2\,n}\left\{\frac{(m+m')x^2-2\,m\,\alpha\,x}{m\,m'\,\alpha^2}\right\}+\frac{\mu^2}{1.\,2.\,2^2.\,n^2}\left\{\ldots\right\}^2+\&c\right\}$$

d'où l'on tire encore

$$z=c'+cx\left\{1+\frac{\mu}{2\,n}\left\{\frac{(m+m')\,x^2-2\,m\,\alpha\,n}{m\,m'\,\alpha^2}\right\}-\frac{\mu}{1.\,2.\,2^2.\,n^2}\left\{\ldots\right\}^2+\&c\right\}$$

La constante c' peut se déterminer par la condition que pour $x=o$, $z=y'$ ce qui donne $c'=y'$; la valeur de c se détermine par la con dition que pour $x=\alpha$, $z=y$ par suite la valeur de z devient

$$+\frac{\frac{\mu}{2nmm'\alpha^2}\left[(m+m')\frac{x^2-\alpha^2}{3}-m\alpha(x-\alpha)\right]\frac{\mu^2}{2.2^2n^2m^2m'^2\alpha^4}\left[(m+m')\frac{x^4-\alpha^4}{5}-m\alpha(m+m')(x^3-\alpha^3)+4m^2\alpha^2\frac{x^2-\alpha^2}{3}+\&c\right]}{1+\frac{\mu}{2nmm'}\left(\frac{m'-2m}{3}\right)+\frac{\mu}{2\,2^2n^2m^2m'^2}\left\{\frac{8^2m-9mm'+3m'^2}{3.5}\right\}+\frac{\mu^3}{2.3.2^3n^3m^3m'^3}\left[\frac{5m'^3-20m'^2m+29m'm^2-16m^3}{5.7}\right]+\&c}$$

Telle est la valeur générale de z. Elle représente effectivement toutes les différentes solutions particulières trouvées jusqu'à présent. En effet: supposons comme Euler $\mu=o$, nous retomberons sur

$$z=\frac{y-y'}{\alpha}x+y'$$

Si on conserve les termes où μ entre à la première puissance, en négligeant celles où il est élevé à des puissances supérieures et en opérant la division algébrique, on retombe sur le résultat de Lagrange $z=y'+\frac{y-y'}{\alpha}\,x+\frac{\mu(y-y')(x-\alpha)x}{6\,n\,\alpha^3}\left(\frac{x+\alpha}{m}+\frac{x-2\alpha}{m'}\right)$.

Si maintenant on reporte la valeur z trouvée plus haut dans les deux équations déterminées en vertu du principe de conservation du mouvement du centre de gravité et du principe des forces vives, on peut résoudre complètement la question; mais il faut pour cela prendre la différentielle de z par rapport à dt et on a alors

$$\frac{dz}{dt}=\frac{dy'}{dt}+\frac{dy-dy'}{dt}.\ \text{F}x$$

et par suite

$$\frac{\mu}{\alpha}\int_0^\alpha \frac{dz}{dt}\,dx=\frac{\mu}{\alpha}\int_0^\alpha \frac{dy'}{dt}dx+\frac{\mu}{\alpha}\,\frac{dy-dy'}{dt}\int_0^\alpha \mathrm{F}x\,dx$$

et de même

$$\frac{\mu}{\alpha}\int_0^\alpha\left(\frac{dz}{dt}\right)^2dx=\frac{\mu}{\alpha}\int_0^\alpha\left(\frac{dy}{dt}+\frac{dy-dy'}{dt}\mathrm{F}x\right)^2dx$$

expressions qui, développées, et après toutes réductions faites, donnent les deux équations suivantes :

$$\left.\begin{aligned}&\frac{dy}{dt}\left\{m+\frac{\mu}{2}-\frac{\mu^2}{1.2.3.4n}\left\{\frac{1}{m}-\frac{1}{m'}\right\}-\frac{\mu^3}{1.2.3.4.5.6n^2}\left\{\frac{1}{m^2}-\frac{1}{m'^2}\right\}+\mathcal{G}^a\right\}\\&+\frac{dy'}{dt}\left\{m'+\frac{\mu}{2}-\frac{\mu^2}{2.3.4n}\left\{\frac{1}{m'}-\frac{1}{m}\right\}-\frac{\mu^3}{2.3.4.5.6n^2}\left\{\frac{1}{m'^2}-\frac{1}{m^2}\right\}t\,\mathcal{G}^a\right\}=0\end{aligned}\right\}\dots\dots(13)$$

et pour la deuxième

$$\left.\begin{aligned}&\ldots+\frac{\mu^3}{3}-\frac{1}{3}\frac{\mu^2}{2^2.3.5n}\left\{\frac{2^3}{m}-\frac{2^3-1}{m'}\right\}+\mathcal{G}^{a}\Big\}+\left(\frac{dy'}{dt}\right)^2\left\{m'^2+\frac{\mu}{3}-\frac{1}{3}\frac{\mu^2}{2^2.3.5n}\left(\frac{2^3}{m'}-\frac{2^3-1}{m}\right\}+\mathcal{G}\right\}\\&\ldots\frac{\mu}{3}+\frac{1}{3}\frac{\mu^2}{2^2.3.5n}\left(\frac{1}{m}+\frac{1}{m'}\right)\Big\}-\mathcal{G}^{a}\Big\}\dots\dots\dots\dots\\&=2\pi c^2\int\int_0^\alpha p\,\frac{d^2z}{dxdt}\,dxdt\end{aligned}\right\}(14)$$

On pourrait tirer de ces deux équations $\frac{dy}{dt}$ ou v et $\frac{dy'}{dt}$ ou v' en fonction de l'intégrale du deuxième membre qu'il s'agirait alors de résoudre et qui ne peut être intégré généralement que par approximation au moyen des quadratures.

On peut trouver de suite la valeur du temps, qui introduite dans le calcul, fait disparaître une variable indépendante. Cherchons pour cela les valeurs de $\frac{d^2y}{dt^2}$ et $\frac{d^2y'}{dt^2}$ et retranchons les l'une de l'autre, nous aurons

$$\frac{d^2y}{dt^2}-\frac{d^2y'}{dt^2}=\frac{d\left(\frac{dy}{dt}-\frac{dy'}{dt}\right)}{dt}.$$

Si nous différentions la valeur de z par rapport à t et que nous y fassions $x=\alpha$, pour laquelle valeur $z=y$ nous aurons une expression qui sera la différentielle de y par rapport à t, de même pour y', en faisant $x=0$ dans la différentielle de z par rapport à t, nous aurons la différentielle de y' par rapport à t; remplaçant $y-y'$ par

θ, on pourra alors prendre θ pour variable indépendante. On aura donc

$$d\frac{\left(\frac{dy}{dt}-\frac{dy'}{dt}\right)}{dt}$$

Pour la différentielle de z par rapport à t, dans laquelle on a fait $x=\alpha$, moins la même différentielle dans laquelle on a fait $x=0$. On peut intégrer cette équation après avoir multiplié les deux membres par $2d\theta$ et l'on obtient ainsi

$$t=\sqrt{\frac{(1-n)\,D\,m\,m'\alpha^{1-n}}{2\,\mu\,K\,\rho'_n\,\gamma^n\left(m'e^{\frac{\mu}{2}\cdot\frac{m-m'}{m.\;m'}}+m\right)}}\int_\alpha^l\frac{d\theta}{\sqrt{\theta^{1-n}-\alpha^{1-n}}}$$

l est la longueur de l'âme de la bouche à feu.

Dans cette valeur de t, on représente par γ l'expression.

$$\gamma=1+\frac{\mu}{2\,n\,m\,m'}\left(\frac{m'-2m}{3}\right)+\frac{\mu^2}{2.\,2^2.\,m^2\,m'^2.\,n^2}\left(\frac{8\,m^2-9\,m\,m'-3\,m'^2}{3.5}\right)+\mathcal{J}^3$$

L'équation précédente pouvant s'intégrer par la méthode des quadratures on aura le temps t après lequel le projectile sera parvenu en un point quelconque de la bouche à feu.

Si on veut avoir la densité des gaz qui est exprimée par $\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ il faut mettre pour c sa valeur dans l'expression de z et l'on a

$$\frac{dz}{dx}=\frac{\frac{y-y'}{\alpha}\,e^{\frac{\mu}{2n}\left(\frac{(m+m')\,x^2-2\,m\,\alpha\,x}{m\,m'\,\alpha^2}\right)}}{1+\frac{\mu}{2\,n\,m\,m'}\left(\frac{m'-2m}{3}\right)+\frac{\mu^2}{2.2^2.m.m'^2n^2}\left(\frac{m^2}{8}+\mathcal{J}^3\right)}$$

ou

$$\frac{dz}{dx}=\frac{1}{\gamma}\,\frac{(y-y')}{\alpha}\,e^{\frac{\mu}{2n}\left(\frac{(m+m')x^2-2\,m\,\alpha\,x}{m\,m'\,\alpha^2}\right)}$$

Si on veut avoir la densité des gaz près du projectile il faut faire $x=\alpha$ dans cette relation, ce qui donne,

$$\frac{dz}{dx}=\frac{1}{\gamma}\,\frac{y-y'}{\alpha}\,e^{\frac{\mu}{2n}\left(\frac{m'-m}{m\,m'}\right)}$$

Puis la substituant dans le produit $\rho'\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}$ on a

$$\rho_{\alpha}=\rho'\frac{\gamma}{\frac{(y-y')}{\alpha}e^{\frac{\mu}{2n}\frac{m'-m}{mm}}}.$$

Pour avoir la densité à la culasse il faut faire $x=0$ ce qui donne

$$\frac{dz}{dx}=\frac{\frac{y-y'}{\alpha}-1}{\gamma}\text{ et alors }\rho_{0}=\rho'\frac{\gamma}{\frac{y-y'}{\alpha}}.$$

La densité maximum correspond comme on le sait au point pour lequel la différentielle de cette densité est égale à 0, c'est-à-dire $\frac{d\left(\frac{dz}{dx}\right)^{-1}}{dx}=0$; cela a lieu quand $x=\frac{m}{m+m'}\alpha$; car pour que $\frac{d\left(\frac{dz}{dx}\right)}{dx}$ ou $\frac{d^2z}{dx^2}$ soit égal à zéro, sans que la densité soit inférieure il faut d'après l'équation (12) que

$$\frac{x-\alpha}{m\alpha^2}+\frac{x}{m\alpha^2}=0,\text{ d'où }x=\frac{m}{m+m'}\alpha.$$

En substituant cette valeur de x, le maximum de densité est donné par l'expression

$$\rho_{1}=\rho'\frac{\gamma}{\frac{y-y'}{\alpha}e^{-\frac{\mu}{2n}\cdot\frac{m}{m'(m+m')}}}.$$

Dans la pratique de l'artillerie cette densité maximum a lieu très-près de la culasse, vers la lumière et elle est sensiblement celle qui a lieu au fond de l'âme. Dans ce cas en effet m est très-petit par rapport à m', environ $\frac{1}{500}$; l'exposant de e est donc extrêmement petit puisque le terme $\frac{m}{m'^2}$ s'y présente. Cet exposant pour $\mu=\frac{1}{3}m$, devient en effet, $\frac{1}{2n\times270000}$ et par suite la valeur de ρ_1 devient sensiblement $\frac{\rho'\gamma}{\frac{y-y'}{\alpha}}$ expression de la densité pour $x=0$, c'est-à-dire à la culasse.

Les limites entre lesquelles varient les densités des différentes tranches sont très-rapprochées ; en effet, avec la charge de 1/3 du poids du boulet, on trouve que le rapport des densités extrêmes est de 1,139 à 1,156 vers la culasse. A la bouche de la pièce ces différences sont encore moindres; par suite $\frac{dz}{dx}$ varie très peu et on peut adopter sa valeur moyenne $\frac{y-y'}{\alpha}$ qui facilite beaucoup l'intégration du second membre de l'équation (14) qui est

$$2\pi c^2 \int\int_0^\alpha p \frac{d^2z}{dx\,dt} dxdt.$$

En effet, sous le signe $\int$, au lieu de

$$p \frac{d\frac{dz}{dx}}{dt} dt.$$

on peut mettre $p \frac{d\left(\frac{y-y'}{\alpha}\right)}{dt} dt$ et comme $y-y'=\theta$, on obtient pour le deuxime membre en question

$$2\pi c^2 \int\int_0^\alpha p \frac{d^2z}{dxdt} dxdt = 2\pi c^2 \int\int_0^\alpha p \frac{d\left(\frac{y-y'}{\alpha}\right)}{dt} dxdt = 2\pi c^2 \int\int_0^\alpha p \frac{d\frac{\theta}{\alpha}}{dt} dxdt.$$

Comme on l'a dit, les densités variant très-peu d'une tranche à l'autre, p peut-être regardé comme indépendant de x et on peut effectuer l'intégration relative à cette variable, entre les limites o et α, ce qui donne

$$2\pi c^2 \alpha \int p \frac{d\theta}{\alpha}$$

et il ne reste plus qu'à intégrer $\int p\,d\theta$. On obtient ainsi un changement de variable indépendante, et l'on peut intégrer cette expression par les quadratures, quelque soit la forme de p en la loi des tensions en fonction de la densité, en mettant pour p ses valeurs successives, à l'aide de la relation trouvée plus haut entre le temps t et l'écartement du boulet à la culasse θ.

D'après ce que nous venons de voir, les équations générales que nous avons obtenues entre les vitesses de la pièce et du projectile,

déterminent ces quantités pour un instant ou pour une longueur d'âme donnée. La vitesse initiale, ou v, sert à calculer les effets du projectile ; la vitesse du recul de la pièce, ou v', sert à calculer les efforts supportés dans le tir par les tourillons et par les affûts, ainsi que la résistance dont ils doivent être susceptibles ; enfin l'expression de la tension des gaz à un instant quelconque et pour toutes les positions du projectile, sert à déterminer la résistance dont les parois doivent être capables, et par suite les épaisseurs à donner au métal ; on sent l'importance d'une pareille détermination, qui fait éviter la construction de bouches à feu ou incapables de résister au tir, ou beaucoup trop lourdes.

Tels sont les calculs qu'il est nécessaire d'effectuer dans l'état actuel de la science, pour déterminer avec quelque chance de succès les différentes dimensions d'une bouche à feu susceptible d'un effet donné, ou réciproquement pour déterminer la résistance, et par suite la charge d'une pièce dont les dimensions sont données.

On peut encore se servir des formules que nous venons de donner, pour déterminer les vitesses initiales des projectiles dans les bouches à feu en usage : mais il faut, pour cela, prendre par expérience la vitesse initiale pour un calibre et en conclure les propriétés de la poudre employée afin de pouvoir calculer les vitesses initiales pour les autres calibres. C'est ce que l'on a fait pour les expériences de l'an XI. On avait construit des deux calibres de 24 et de 6 des pièces de longueurs d'âme différentes et portant depuis 11 jusqu'à 20 calibres. On a tiré ces pièces sous des inclinaisons différentes depuis 0° jusqu'à 10 degrés et à 10 coups par inclinaison différente. On a observé ainsi pour chaque longueur d'âme, une série de cent coups, de laquelle on a déduit, en prenant une moyenne, la vitesse initiale correspondante à la même charge pour chacune de ces longueurs d'âme. Voici le tableau des vitesses observées :

Nombre de calibres de longueur d'âme.	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
Vitesse moyenne en pieds déduite de l'observation des 100 coups d'épreuve.	1457 1/2	1444	1434 1/2	1423	1407	1390	1368	1343	1322	1290

On a ensuite calculé exactement les valeurs de ces vitesses initia-

les à l'aide des formules données précédemment, en tenant compte des pertes par le vent et par la lumière, ainsi que de la succession de l'inflammation et de la combustion. On s'est servi des résultats obtenus par Rumfort à l'aide de la relation entre les tensions et les densités des gaz, et voici la série des résultats obtenus par le calcul:

1457. 1443. 1432. 1419. 1404. 1388. 1370. 1349. 1322. 1290.

On voit qu'il est impossible d'obtenir une coïncidence plus parfaite entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience. Il en a été absolument de même pour les vitesses initiales du calibre de 6 correspondantes aux différentes longueurs d'âme et dont les valeurs observées ou calculées ont différé au plus de quelques pieds.

Formes intérieures des Bouches à feu.

L'intérieur des bouches à feu se compose de trois parties distinctes : le canal qui sert à communiquer l'inflammation à la poudre, ou la lumière; l'espace occupé par la charge, espace qui se nomme chambre quand il est d'un diamètre ou d'une forme différente du reste de l'âme ; enfin la partie de l'âme parcourue par le projectile. Nous nous occuperons successivement de ces trois parties.

La partie de l'âme parcourue par le projectile devant le diriger et contenir des fluides élastiques qui agissent sur lui, devrait être terminée par une surface qui envelopperait toutes les positions successives que le projectile doit prendre depuis l'origine de son mouvement jusqu'à sa sortie de la bouche à feu. Il en est ainsi dans les armes à projectiles forcés, parce que ceux-ci sont ordinairement en plomb, métal beaucoup plus mou que celui du canon et se moulent facilement sur la forme intérieure de l'âme; mais quand le projectile est formé d'un métal non compressible, comme la fonte, il est nécessaire d'augmenter le vide de l'âme de la quantité dont un projectile peut différer d'un autre afin qu'il ne soit pas arrêté dans sa marche. Les boulets peuvent être lancés après avoir été rougis au feu et prennent alors un diamètre de 9 à 11 points plus fort qu'à la température ordinaire ; les pièces s'encrassent, et enfin dans les canons de campagne, le boulet est en-

touré de bandelettes qui le retiennent au sabot. Ces différentes considérations nécessitent une différence entre le diamètre de l'âme et celui du projectile : cette différence se nomme le vent, et doit être aussi petite que l'exécution du matériel et de la nature du service peuvent le permettre, afin de diminuer autant que possible les pertes du fluide et le défaut de direction. Dans les canons de siége le vent est de 18 points ; il est de 12 dans ceux de campagne, réduit à 2^{mm} dans les obusiers de campagne et de siége, à 1^{mm} 1/2 dans l'obusier du calibre de 12 ; mais il reste de 3^{mm} dans l'obusier de côte.

Les projectiles sont sphériques, et l'avantage de cette forme consiste en ce que les centres de gravité de figure et de résistance coïncident toujours à très-peu près et que par suite il ne peut y avoir d'aussi grandes causes de déviations occasionnées par la résistance de l'air qu'avec une autre forme, et que de plus le projectile présente la même section dans tous les sens. Cette forme détermine celle de l'âme qui doit être un cylindre à base circulaire dans les cas ordinaires. Pour les armes à balles forcées comme les carabines, on creuse ordinairement des hélices le long de l'âme afin de communiquer aux projectiles un mouvement de rotation autour d'un axe tengent au premier élément de la trajectoire, et que ce mouvement symétrique, par rapport à la direction de cette trajectoire, n'occasionne de déviation en aucun sens ; la rotation ayant lieu par rapport au plus grand ou au plus petit axe principal, il y a permanence dans la position de cet axe et la justesse du tir en est plus assurée. Du reste l'hélice tracée dans le canon doit avoir une courbure fort allongée pour présenter un avantage réel.

On a construit quelquefois des armes dont la section perpendiculaire à l'axe n'était pas un cercle, ou dont l'âme n'était pas un cylindre droit. Ainsi les tromblons et les schouwalofs allaient en s'évasant les uns horizontalement et les autres coniquement pour disperser les petites balles dont ils étaient chargés : quelques fusils anciens conservés dans les musées présentent pour section perpendiculaire à l'axe une espèce de trefle ou une étoile. Toutes ces différentes armes ont été abandonnées.

Lorsqu'en l'an XI on fit des expériences sur les formes des bouches à feu, on voulut pour rendre les canons de 24 plus portatifs, diminuer de beaucoup leur longueur d'âme ; mais comme ces piè-

ces tirées au 1/3 et même au 1/2 du poids du boulet, dégradaient en très-peu de coups les embrâsures dans lesquelles leur volée ne pouvait entrer, on imagina les *parasoufles* qui sont des prolongements de l'âme avec un plus grand diamètre et une faible épaisseur.

Quelques auteurs Allemands et particulièrement en Suède le général Helwig, ont prescrit de terminer l'âme des canons près de la bouche par une portion conique, afin de préserver les projectiles des déviations que causerait un choc en cet endroit qu'on y remarque. Ce mode de construction adopté par les Suédois a été entièrement abandonné par eux dans le nouveau modèle de 1831.

Le projectile devant à sa sortie de la bouche à feu, se mouvoir suivant une trajectoire, l'axe de l'âme devrait en être le prolongement pour ne recevoir aucun choc. Euler a calculé que si l'âme formait un arc dont le rayon de courbure fut de 100 pieds, le boulet le parcourant avec une vitesse de 1500 pieds par seconde, exercerait contre le canon, une pression qui serait 740 fois plus grande que son propre poids. On conçoit qu'un pareil choc, si la pièce est légère, puisse la soulever et par suite causer une déviation du projecticle.

L'âme des pièces éprouve dans le tir des dégradations qui finissent par nécessiter leur mise hors de service. Au point de l'âme où le boulet repose, il se fait assez promptement un refoulement de métal que l'on nomme logement du boulet. Dès que ce logement fait atteindre au diamètre du calibre un accroissement de 25 points, la pièce est hors de service. Il peut encore se manifester dans la longueur de l'âme d'autres refoulements que l'on nomme battemens; lorsqu'ils ont 21 points de profondeur et qu'en même temps le logement est aussi de 21 points, la pièce est encore mise hors de service.

On peut s'assurer que ces limites d'enfoncement du logement et des battemens sont précisément celles au-delà desquelles la pièce n'a plus de régularité dans le tir, et devient ce que l'on appelle *folle*.

Supposons qu'une pièce ait un logement à l'emplacement du projectile et un battement à la partie supérieure de l'âme. La ligne qui joindra les centres du projectile placé en l'un et l'autre de ces points, déterminera par son intersection avec l'axe de la pièce l'angle d'inclinaison sous lequel le boulet partant du loge-

ment vient frapper la paroi supérieure au battement; connaissant la vitesse dont le projectile est animé et la hauteur de ce battement, on pourra décomposer la force du choc en ce point, et déterminer la valeur de la force normale qui tendra à soulever la pièce.

Voici un tableau qui fait connaître en poids du boulet, les pressions capables de soulever une pièce, pour des battemens de 21 points situés à différentes distances du fond de l'âme, et la pression réelle qu'exerce le boulet partant d'un logement de 21 points.

Distances en calibres, du battement au fond de l'âme	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.
Pression nécessaire pour soulever la pièce de 24	163.	156.	144.	135.	»	120.	»	107.	»	»	91.
id. id. de 16	184.	174.	161.	150.	»	131.	»	117.	»	»	100.
id. id. de 12	186.	177.	165.	155.	»	136.	»	121.	»	»	104.
Pression réelle exercée par le boulet	220.	175.	150.	130.	112.	97.	»	77.	»	»	54.

On voit que pour le 24 quand le battement est situé entre 13 et 14 calibres, la pièce peut être soulevée. Pour le 16 c'est vers 12 calibres que doit être le battement et enfin pour le 12 le battement doit être à un peu moins de 11 calibres du fond de l'âme.

Si donc les pièces ne sont pas assujéties par des surbandes comme dans les pièces de place et de côte, elles peuvent être facilement soulevées dès que le choc est assez rapproché de la culasse.

Si on suppose diminuée la profondeur du logement et du battement, les nombres 220, 175, etc. etc., qui représentent la pression réelle tendant à soulever la pièce aux différentes distances du fond de l'âme, décroissent très rapidement; et, avec quelques points de moins seulement, la pièce ne peut plus être soulevée par le choc de son projectile. C'est donc précisément à l'époque où son tir est rendu complètement incertain par la profondeur du logement et du battement qu'une pièce est mise hors de service.

Quand une pièce a un logement de 25 points, les battements sont promptement déterminés et croissent très rapidement. Le tir de la pièce devient tout à fait incertain, et le choc est quelquefois asssez violent pour briser le projectile. Si on continuait à faire usage d'une pièce ainsi détériorée, elle finirait par s'ouvrir au point où existe le battement.

Quand la pièce est montée sur un affût de siége ou de campa-

gne, les surbandes s'opposent au soulèvement de la volée et peuvent alors être faussées, comme cela arrive souvent. Dans ce cas la culasse réagit sur la vis de pointage et augmente beaucoup la fatigue de l'affût en ce point. Tout le système tend à tourner autour des crosses, mais comme le poids de la pièce est augmenté de celui de l'affût, le soulèvement de la volée n'a pas lieu généralement, à moins d'une rupture des surbandes ou du support de la culasse; c'est ce qui est arrivé dans les épreuves d'un ancien obusier de montagne, dont le projectile avait une masse assez grande relativement à celle de la bouche à feu : cet obusier, pointé sous un angle de 10 degrés, reçut un choc si violent de l'obus, que la semelle fut brisée et que l'obus partit sous un angle de 18° au lieu de 10°.

Si le battement se manifeste dans la partie inférieure de l'âme, l'effet qui en résulte est inverse de celui que nous venons d'examiner. Si la culasse est trop légère, c'est elle qui est soulevée, la volée baisse et on dit alors que la pièce saigne du nez, c'est ce qui est arrivé dans l'obusier de l'an XI auquel on a dû renoncer.

Si le battement a lieu en arrière des tourillons et dans la partie supérieure de l'âme, la volée peut encore baisser ; s'il a lieu en dessous, entre les tourillons et la vis de pointage, l'effort du choc se répartit sur ces deux points et peut suffire pour briser l'affût ; c'est pour cela que dans l'obusier de siège nouveau modèle, les tourillons sont placés à peu près vers le point où l'obus repose dans la bouche à feu.

Dans les pièces de campagne adoptées en Angleterre, pour éviter l'abaissement de la volée, on a assujéti la culasse à la vis de pointage ; la pièce se trouve ainsi faire système avec l'affût et ne peut par conséquent être aussi facilement soulevée ou abaissée. Les battemens latéraux tendent naturellement à changer le plan vertical de la trajectoire, et la pièce cède, si les tourillons ne sont pas parfaitement fixés dans leurs encastremens.

Du reste les mêmes inconvéniens pour la justesse du tir peuvent aussi provenir d'un défaut de rectitude dans l'âme des bouches à feu. Anciennement on forait les canons à l'aide de méthodes peu précises, qui introduisaient souvent une excentricité très grande de l'âme et de la surface extérieure. Il y a encore chez les russes des bouches à feu dont l'excentricité atteint jusqu'à un pouce.

Nous reviendrons plus tard sur cette excentricité.

D'après ce que nous venons de voir, on sent qu'il est important d'empêcher, autant que possible, la formation du logement du boulet et du battement. On a essayé d'y remédier par la composition même du métal des canons. On a reconnu que le bronze qui contenait moins de 10 pour cent d'étain n'était plus assez dur et permettait au boulet de pratiquer très promptement son logement. Quand la proportion d'étain passait 12 pour cent le bronze devenait plus dur, mais en même temps plus fusible. Il se formait des affouillemens et des taches d'étain, surtout vers le pourtour de la charge, où les pièces étaient promptement détériorées. Les limites entre lesquelles on doit faire varier la portion d'étain sont donc si resserrées qu'on ne peut songer à améliorer le bronze.

On a essayé d'autres alliages, et tous ont été reconnus inférieurs au bronze. Ainsi on a tenté d'introduire du fer dans le métal des canons, et les pièces ont encore moins bien résisté. On a encore cherché si des manchons en fonte ou en acier adaptés dans l'âme de la pièce vers le pourtour de la charge et du projectile ne remédieraient pas aux défauts du bronze et l'on n'a pas tardé à reconnaître que ce mode de construction était encore plus vicieux ; ces manchons étaient ou composés de douelle juxtaposées, ou tout d'une pièce. Comme les différens métaux ont des dilatations différentes, et que la température des parois d'une bouche à feu peut passer de 0° à 80°, le manchon intérieur en s'échauffant plus que le bronze auquel il est soudé ou seulement adjacent, se dilate plus que lui et le comprime ; quand la température s'abaisse pour revenir à l'état normal, le manchon reprend ses dimensions premières, mais le bronze refoulé n'y revient plus, parce que son élasticité a été dépassée par la pression. Il se forme ainsi un vide entre le fer et le bronze et le manchon qui alors ne se trouve plus soutenu pendant le tir, doit se fendre et se briser dans sa longueur. C'est effectivement ce qui est arrivé constamment avec ces sortes de pièces.

Une nouvelle raison pour laquelle le métal ne doit pas être trop mou, c'est la facilité avec laquelle il peut s'opérer un refoulement autour de la charge, dans le moment de son explosion. On a pensé remédier à la formation du logement par l'emploi du sabot ; mais comme il augmente la tension des gaz en arrière du boulet, puis-

qu'il diminue la perte du gaz par le vent, le métal se refoule évidemment d'autant plus qu'il est plus mou ; et par suite, si le logement du boulet est plus longtemps à se former à cause de la présence du sabot, il arrive aussi que le pourtour de la charge se détériore plus rapidement, et que le refoulement ou la dilatation de l'âme, dans cette partie, augmente avec plus de promptitude.

On s'occupe d'expériences relatives à un moyen de remédier à cette dégradation de l'âme; ce moyen consiste à diminuer un peu le diamètre de la charge et par suite à en augmenter la longueur. Ce mode de chargement est comme on le voit fondé sur ce que la pression diminue beaucoup quand la densité diminue très-peu. On atteint ce résultat en augmentant un peu le volume dans lequel les gaz peuvent se développer; alors la pression étant moins forte les parois du pourtour de la charge ont moins à souffrir et se détériorent moins vite. On peut objecter qu'il y a diminution d'action sur le projectile puisqu'il y a moindre tension des gaz. Mais le vide qui existe alors entre la gargousse et les parois supérieures et latérales de l'âme permet aux gaz de pénétrer plus rapidement dans les parties antérieures de la charge ; l'accélération d'inflammation obtenue ainsi, compense la perte de pression.

Le calcul a mis sur la voie de cette importante amélioration que des expériences doivent encore sanctionner.

Nous allons maintenant nous occuper spécialement de la partie de l'âme qui entoure la charge. Elle a la forme la plus simple quand elle n'est autre chose que le prolongement de l'âme et ce mode de construction du pourtour de la charge est adopté pour toutes les bouches à feu destinées à lancer des projectiles pleins, c'est-à-dire, pour les canons. Les charges étant généralement au dessus de 1/6 du poids du boulet, doivent être renfermées dans des gargousses dont la longueur est plus grande que le calibre du boulet. On conçoit aisément qu'il y a un avantage réel à donner à la charge le moins de longueur possible, pour diminuer d'un côté le temps nécessaire à son inflammation, et de l'autre la surface de parois en contact avec les gaz, et qui tendent à leur enlever une partie de leur calorique. D'ailleurs plus le projectile est près du fond de l'âme, plus le volume dans lequel les gaz peuvent se développer est petit et plus leur action sur le projectile est grande ; de là il résulte cependant un inconvénient, c'est que le refoulement ou

la dilatation qu'éprouve le pourtour des fortes charges, augmente le vent du boulet lorsque celui-ci est placé contre les petites charges; mais au moyen de bouchons plus ou moins longs, on peut faire varier la position du projectile. L'expérience a prouvé que c'était un des meilleurs moyens à employer pour la conservation des pièces de bronze, bien qu'il ne puisse empêcher les dégradations ordinaires de s'y manifester à la longue. La dilatation du pourtour de la charge peut être très-considérable; car dans les expériences faites à Strasbourg, on a trouvé qu'elle pouvait aller jusqu'à 96 points, bien que la pièce donnât encore de bonnes directions dans le tir avec sabots.

Si l'âme était terminée par un plan sans arrondissement, il est facile de voir qu'il y aurait tendance du fond de l'âme à se séparer de la partie cylindrique, suivant le cercle de jonction; et cela aurait lieu, quoique la dilatation du pourtour de la charge aille réellement en diminuant vers le fond de l'âme, à cause de la plus forte résistance qu'oppose le massif de la culasse. En effet, si un canon foré sans arrondissement du fond avait éprouvé une dilatation de 96 points, les génératrices opposées de la partie cylindrique, se seraient écartées de 4 lignes de leurs positions primitives et par suite les points d'intersection du diamètre du fond qui aboutit sur la courbe de jonction aux deux génératrices opposées, ne pouvant demeurer à la fois sur ces génératrices et sur le diamètre dont ils sont les extrémités, et cela ayant lieu pour tous les systèmes de génératrices opposées, il se serait manifesté une fissure plus ou moins profonde suivant la circonférence de jonction et il y aurait eu ainsi déchirement du métal sur tout le pourtour du fond. Pour remédier à cet inconvénient, on a raccordé le fond de l'âme avec la partie cylindrique par une surface annulaire qui est susceptible de se prêter sans déchirement à la dilatation. Il est évident que plus l'arc du cercle générateur sera grand, plus cette surface annulaire offrira de résistance. La forme hémisphérique est donc celle qui présenterait le moins de chances de déchirement; mais comme elle entraînerait des inconvénients qui compenseraient et au-delà les avantages de cette forme, on a adopté, pour les pièces de bronze, un raccordement annulaire dont l'arc générateur est décrit avec un rayon égal au 1/8 du calibre, et pour les pièces de fonte avec un rayon égal au

1/4 du calibre. Quant à la forme hémisphérique, outre les difficultés de construction qu'elle offrirait, elle ne permettrait pas à la charge de pénétrer jusqu'au fond de l'âme, ce qui amènerait la présence d'un vide préjudiciable à l'effet des gaz.

Le fond de l'âme des canons a été quelquefois rétréci, comme dans les anciennes pièces encampannées, soit pour diminuer l'espace réservé à la charge pour les projectiles creux, comme cela avait été pratiqué pour les boulets de pierre, soit pour faire disparaître le vent. Cette disposition qui, comme toutes les chambres, fixe la place du projectile et rend le vide en arrière constant, quelle que soit la charge, ne procure aucun avantage aux pièces longues, puisque le vent n'est détruit que dans les premiers moments de l'inflammation, où les fluides n'ont pas encore acquis leur maximum de tension : elle retarde aussi l'inflammation des fortes charges nécessaires aux projectiles pleins, puisqu'elle force à allonger les gargousses.

Mais pour les âmes courtes et pour les projectiles creux qui, étant lancés avec de faibles charges relativement à leur poids, éprouvent le plus grand effet des gaz avant leur déplacement, ce rétrécissement de la chambre présente réellement de l'avantage.

La forme à donner aux chambres des bouches à feu très courtes, comme les mortiers, a fait naître de longues discussions qui n'ont pas encore amené de convergence d'opinion. Les uns soutiennent que les chambres cylindriques ont l'avantage, les autres l'accordent aux chambres tronconiques, et la vérité est que les deux formes ont chacune de l'avantage sur l'autre, suivant que le tir s'effectue à petites ou grandes charges, et il est possible de s'en rendre compte. Supposons d'abord que la charge soit très-petite, si la chambre est cylindrique, les gaz agissent sur une moins grande surface de la bombe, la vitesse de celle-ci est moins grande, et la combustion de la charge est plus complète, lorsque la bombe sort de l'âme. Si la chambre est tronconique, la vitesse initiale de la bombe est plus grande et il y a une partie de la charge qui est encore intacte lorsque la bombe franchit la tranche de la bouche ; il y a donc une partie des gaz dont l'effet est perdu ; d'un autre côté, les gaz sont en contact d'une plus grande surface et perdent, par suite, de leur tension ; dans le cas de petites charges la chambre cylindrique offre donc un avantage sur la chambre tronconique.

Mais si la charge est grande, la chambre tronconique reprend l'avantage, parce que la bombe reçoit une impulsion très-grande à cause de la partie de la surface qui est exposée à l'action des gaz. Cette surface est beaucoup moindre pour la bombe tirée dans le mortier à chambre cylindrique et la différence d'action ne peut être compensée par la différence de surface en contact avec les gaz au premier moment.

Voici un tableau comparatif des portées des mortiers à chambre cylindrique et à chambre tronconique pour les mêmes charges. On y voit effectivement l'avantage demeurer aux premiers pour les petites charges et passer ensuite aux seconds pour les grandes charges.

	CHARGES.	PORTÉES DES MORTIERS A CHAMBRES CYLINDRIQUES.	PORTÉES DES MORTIERS A CHAMBRES TRONCONIQUES.
Mortier de 10 pouces.	0kil,50	456m	390m
	0 , 75	790	695
	1 , 00	1060	969
	1 , 25	1290	1297
	3 , 20	»	2530
	3 , 60	2530	2750
Mortier de 8 pouces.	0kil,25	525m	210m
	0 , 50	775	540
	0 , 60	1250	1308

Un avantage très-grand de la chambre tronconique dans le cas des grandes charges est de repartir l'action des gaz sur un plus grand nombre de points du projectile et par suite de diminuer les chances de la rupture. Gribeauval remarquant combien il arrivait souvent dans le tir du mortier de 12 pouces à chambre cylindrique du système de Vallières que la bombe fut brisée avant de sortir de l'âme, avait rejeté cette bouche à feu comme plus nuisible qu'utile. Cet inconvénient ne se présente pas actuellement dans le tir des mortiers de 12 pouces à la Gomer.

On pourrait s'étonner de ce que, malgré ce grave inconvénient, l'on ait continué à se servir des mortiers de 12 pouces à chambre cylindrique jusqu'au remplacement du système de Vallières par celui de Gribeauval, si on ne savait quel était alors le mode de chargement de cette bouche à feu. Pour y introduire la charge et la bombe, les servants plaçaient le mortier verticalement

et entre la charge et la bombe interposaient une couche de terre très-fine, qui était destinée à atténuer le choc des gaz sur le projectile. On pointait ensuite le mortier, on allumait la fusée de la bombe puis on donnait le feu à la charge. De cette manière la bombe se trouvait ménagée et on évitait la rupture. C'est de cette ancienne manœuvre que l'on a conservé comme un des armemens nécessaires au service d'un mortier, le sac à terre dont l'usage est borné aujourd'hui à nettoyer la bombe et l'âme du mortier.

On a essayé à plusieurs reprises de construire des pièces de siége avec un rétrécissement au pourtour de la charge; ainsi l'on a fait en l'an XI des expériences sur deux canons de 16 dont l'un était encampanné et l'autre cylindrique. Dans le premier la chambre était légèrement conique et avait 18 pouces de longueur et 3 pouces 9 lignes de diamètre au fond, de sorte que le boulet était plus loin du fond de l'âme que dans l'autre pièce; la charge était au 1/3 du poids du boulet. On tira ces deux pièces sous des angles de 0° à 10° et à 10 coups par pièce.

La somme des portées de la pièce encampannée fut de 7277 toises tandis que la somme des portées de la pièce cylindrique fut 7603 toises. La vitesse initiale moyenne fut de 1415 pieds pour la première et de 1460 pour la seconde. On voit donc que dans ces expériences l'avantage est resté au canon cylindrique sans chambre. Le résultat pourrait être différent si les charges occupaient moins de 1 calibre de longueur d'âme.

Avant de fixer définitivement la forme à donner à la chambre des obusiers du nouveau modèle, on a fait de nombreuses expériences sur les avantages et les inconvéniens des différentes espèces de chambre que l'on pourrait adopter pour ces bouches à feu. Ainsi dans les épreuves faites en 1819 à Lens et à Strasbourg sur les obusiers de 6 pouces, et de 24, d'environ de 10 calibres de longueur, on s'est servi comparativement d'obusiers à chambre conique allongée et courte, à chambre cylindrique et enfin sans chambre. Les charges successivement employées ont été de 3, 4 et 5 livres de poudre pour l'obusier de 6 pouces, et l'on a tiré plus de 50 coups par inclinaison différente et l'on a pu comparer les vitesses initiales imprimées à l'obus par la même charge dans ces différentes bouches à feu.

La chambre conique allongée, dans laquelle la charge occupait toujours en longueur plus du double du diamètre moyen, eut constamment le désavantage. La chambre conique courte, eut l'avantage à la charge de 3 livres qui avait une longueur un peu plus grande que son diamètre moyen. La chambre cylindrique partagea avec elle l'avantage à la charge de 4 livres et eut même une légère supériorité; la charge de 4 livres occupait une longueur un peu moins grande que son diamètre. Enfin cette chambre cylindrique eut complètement l'avantage à la charge de 5 livres, qui occupait une longueur égale à son diamètre. L'âme sans chambre, dans laquelle la charge eut toujours une longueur moindre que son diamètre, était un peu inférieure aux deux précédentes et se rapprocha toujours beaucoup de la moyenne. Il est probable qu'elle eut pris le dessus si les charges eussent été encore plus grandes.

Voici le tableau des valeurs comparatives des vitesses initiales obtenues, dans cette série d'expériences.

Vitesses initiales des obusiers avec obus de 6^{po}.

CHARGES DE POUDRE.	A CHAMBRE conique allongée	A CHAMBRE conique courte.	A CHAMBRE cylindrique.	SANS CHAMBRE.	MOYENNE.
3 livres.	1121^{pi}	1168^{pi}	1115^{pi}	1112^{pi}	1129^{pi}
4 livres.	1178	1232	1240	1213	1216
5 livres.	1219	1262	1275	1239	1249
Moyenne générale.	1173	1221	1210	1188	1198
Sommes des portées à toute charge.	20304^{toi}	20510^{toi}	20245^{toi}	19462^{toi}	»
Dans le rapport des nombres.	406	410	405	439	»

Les expériences n'ayant pour but que de déterminer la forme de la chambre capable de donner la plus grande vitesse initiale, on a

adopté la chambre cylindrique en modifiant un peu son mode de construction.

D'après le tableau qui précède on voit que dans les bouches à feu allongées, la présence des chambres et leur forme, ne donnent à la vitesse initiale que de très-faibles variations qui tiennent plutôt à l'influence des charges, c'est-à-dire, à l'augmentation du temps d'inflammation de cette charge, quand elle est plus allongée.

Dans les bouches à feu très-courtes au contraire, l'influence des chambre se fait beaucoup plus sentir, principalement à cause des différences de capacité et de surface des parois, qui font varier les tensions et les températures des gaz, et ensuite parce que ces gaz n'agissant que pendant un temps très-limité ne peuvent compenser les différences, pendant les instants qui suivent le déplacement du projectile. Comme la nature de la poudre a une influence très-grande sur l'effet auquel le projectile est soumis, on voit qu'il serait avantageux de pouvoir combiner la forme de la chambre des bouches à feu avec les propriétés de la poudre employée, c'est-à-dire faire dépendre leurs formes et leurs dimensions des vitesses de combustion et d'inflammation de la poudre,

On a construit des chambres sphériques dont on pensait obtenir de très-grands avantages. Ces chambres raccordées avec l'âme par un cylindre d'assez faible diametre offraient effectivement l'avantage de contenir une charge d'un poids donné sous la plus petite surface possible. Le projectile qui reçoit l'action des gaz sur une très petite portion de la surface se meut un peu moins rapidement dans les premiers moments de l'explosion de la charge; mais dès qu'il a été déplacé, les gaz qui se répandent dans l'âme forment une gerbe fortement épanouie et cette expansion subite diminue leur température et leur tension. L'effet avantageux du premier instant se trouve donc compensé par une perte de tension très-grande; d'ailleurs les gaz en se développant dans la chambre sphérique ont une température et une tension beaucoup plus élevées que dans toute autre chambre; les parois et surtout celles de l'orifice éprouvent en consequence des dégradations très-fortes et très-rapides et les affûts eux-mêmes sont très tourmentés par ces sortes de bouches à feu. Ces diverses considérations ont fait complètement renoncer aux chambres spheriques qui avaient été employées dans les canons dits a l'Espagnole et les mortiers.

Il résulte de tout ce que nous avons dit sur les chambres, qu'avant de les employer il faut considérer le volume de la charge dont on doit se servir, et reconnaître si celle-ci occupe une longueur plus ou moins grande qu'un calibre de l'âme. La dimension qui produit un cylindre équilatéral est précisément la limite au-dessous de laquelle l'emploi de la chambre est avantageux, tandis qu'il est désavantageux, au-dessus; puisqu'alors il forcerait à allonger la gargousse en diminuant sensiblement la durée de l'inflammation.

Dans tous les obusiers nouvellement construits, la chambre est cylindrique ; mais le raccordement de cette chambre avec l'âme varie suivant que l'obus doit être ou ne pas être ensaboté. Comme l'obusier de siége peut être mis en batterie en arrière des cheminemens de l'assiégeant, on ne doit pas, avec cette bouche à feu, faire usage des sabots dont les éclats pourraient blesser les hommes postés en avant ; il faut que l'âme soit assez courte pour que l'obus puisse être mis en place à la main ; alors le sabot devient inutile, et la chambre de ces obusiers est raccordée avec l'âme par un arrondissement dont le rayon est le même que celui de l'âme, forme qui permet à l'obus d'être placé contre la charge. Pour les autres obusiers qui sont destinés à lancer leurs projectiles avec une grande vitesse, il faut que l'âme soit longue et par suite que l'obus, qui ne peut être mis en place à la main, soit ensaboté. Dans ce cas le raccordement de la chambre avec l'âme se fait par une surface conique dont les arêtes vives sont remplacées par des parties annulaires tracées avec le rayon de l'âme pour rayon. Le sabot est conique et vient s'adapter dans le raccordement ; les arêtes vives étant supprimées laissent un vide qui n'a pas d'inconvénient dans le tir des obus ; l'arrondissement serait d'ailleurs bientôt produit par le seul passage des gaz, s'il n'était formé à l'avance.

Dans l'éprouvette, on laisse subsister l'arête vive de raccordement pour obtenir plus de précision dans les épreuves de la poudre. Cette arête s'émousse cependant assez vite : aussi les éprouvettes neuves sont-elles beaucoup plus précises que celles qui ont servi souvent.

Il est une dernière espèce de chambre qui a été fort en usage dans le système d'artillerie de Vallières, et qu'on nommait chambre porte-feu. Comme on n'employait pas alors les grains de

lumière, les gaz en s'échappant avec une très haute température, mettaient bientôt en fusion le bronze des parois du canal de la lumière. Ils lui faisaient éprouver de grandes dégradations, et leur action repétée mettait promptement les pièces hors de service. On imagina alors de terminer l'âme des canons par une chambre cylindrique de petites dimensions et au fond de laquelle aboutissait la lumière. Cette chambre avait pour le 24 une longueur de 2 pouces 6.^{lig} et un diamètre de 1^{po} 6^{lig}; pour le 16 elle n'avait que 1^{po} 10^{lig} de longueur et un diamètre de 1^{po}. De cette manière l'épaisseur du métal autour de la chambre porte-feu était beaucoup plus grande et le canal de lumière plus long. La chambre porte-feu contenait environ 2 onces de poudre, capable d'opérer un petit déplacement de la charge et du boulet avant l'action de la charge entière; de sorte que le boulet ne partait pas aussi brusquement et que la tension maximum des gaz n'avait lieu que lorsqu'il était déjà plus avancé dans l'âme. Les gaz se dégageaient aussi en moins grande quantité par la lumière et par suite les dégradations qu'elle éprouvait étaient plus faibles. On doit peut-être attribuer à la présence des chambres porte-feu, la durée des canons de Louis XIV, qui, fondus au même titre et par les mêmes méthodes que nos canons actuels, ont cependant mieux résisté aux sièges nombreux entrepris par les armées de ce prince. Cet avantage étant d'ailleurs plus que compensé par la difficulté réelle qu'il y a à nettoyer les chambres de petit diamètre, et par les précautions multipliées que nécessite l'introduction de la charge, on a dû renoncer à ce mode de construction.

Lumière.

Le canal de la lumière doit être aussi petit que le service peut le permettre, parce que plus la quantité des gaz qu'elle laisse échapper est grande, plus elle s'échauffe et plus facilement elle se dégrade. Pour éviter la fusion des parois de la lumière, lorsqu'on a renoncé aux chambres porte-feu, on a d'abord adapté aux bouches à feu, pendant l'opération de la fonte, des *masses* de lumière en cuivre rouge, métal beaucoup moins fusible que le bronze. Aujourd'hui on emploie les grains de lumière qui s'adaptent aux pièces après la fonte et à froid. Le diamètre du canal de

lumière est de 2 lignes 1/2 ou 5mm6. Pour les obusiers de montagne, le diamètre n'est que de deux lignes à cause de la faible épaisseur du métal. (*) Enfin pour le mortier éprouvette la lumière n'a que 1lig 9points de diamètre. On a dû donner aux lumières des pièces de siége et de campagne un canal de 2li 1/2 pour permettre à un dégorgeoir assez résistant de pénétrer dans la pièce et d'y percer la charge. D'ailleurs les étoupilles n'ont guère moins de deux lignes de diamètre ; aussi est-on obligé de choisir celles dont les roseaux sont les plus minces pour le service des obusiers de montagne. Quant à l'éprouvette, le faible diamètre de son canal de lumière est nécessaire pour arriver à la précision à laquelle on doit tendre dans les épreuves des poudres.

L'emplacement de la lumière vers le fond de l'âme est déterminé par plusieurs raisons : la première est l'expulsion des parties enflammées du sachet qui contient la charge et qui se trouvent projetées au dehors de l'âme par suite de cette disposition. Si la lumière venait aboutir près du boulet, celui-ci serait déplacé et parti avant que la charge fut complètement enflammée, et par suite il y aurait une grande perte d'action. Si la lumière venait porter le feu au milieu de la charge, comme on a conseillé souvent de le faire afin d'obtenir le plus grand effet possible, le boulet serait plus vite en mouvement que si le feu était mis à la partie postérieure de la charge, et la capacité dans laquelle les gaz auraient la liberté de se développer serait plus grande que dans l'autre cas, après le même intervalle ; il y aurait ainsi diminution de tension et d'effet produit. C'est donc entre le milieu de la charge et le fond que se trouve le point où l'on doit appliquer le feu, pour obtenir le maximum d'effet. L'expérience a prouvé la vérité de ce fait ; mais comme la vitesse d'inflammation de la poudre employée influe naturellement beaucoup sur l'emplacement le plus avantageux à donner à la lumière, les expériences faites dans différents pays sur la position de la lumière la plus favorable à la vitesse initiale du projectile, ne se sont pas accordées, parce que l'on a négligé de spécifier d'une manière assez précise, la poudre dont on s'est servi dans ces expériences.

On a cherché à déterminer l'influence de l'emplacement de la

(*) Il a été porté à 5mm6, comme pour les autres bouches à feu.

lumière sur le fusil du modèle de 1777, portant une balle de 20 à la livre et une charge de 11gram, 14, non compris l'amorce. La lumière de ce fusil a été successivement éloignée de ligne en ligne depuis 1 jusqu'à 21 lignes du fond, et l'on a pris pour chaque lumière la moyenne de 60 coups. On a reconnu ainsi que le maximum de vitesse initiale de la balle était donné par la lumière percée à environ 1 ligne du fond de l'âme. D'un autre côté le maximum de recul déterminé par les mêmes expériences ayant lieu pour la lumière percée vers 9 lignes du fond, on a pu admettre que la meilleure disposition à donner était celle qui rapproche l'orifice du canal de lumière, à une ligne de la culasse.

Dans les pièces de Gribeauval, la lumière aboutit à 2 ou 3 lignes du fond de l'âme et sa direction fait avec la verticale un angle d'environ 15°. Cette inclinaison légère est donnée pour que le dégorgeoir atteigne toujours la charge et ne puisse se glisser entre elle et le fond de l'âme. Dans les nouveaux obusiers, la distance de la lumière au fond de l'âme a été portée à 20mm, afin que l'extrémité du grain de lumière ne fut pas coupée trop en sifflet par l'arrondissement du fond de l'âme; de la sorte on a pu redresser la direction du canal de lumière dont l'inclinaison a été fixée à 10°.

Après nous être occupés de l'influence qu'exerce sur le tir des bouches à feu, la position de la lumière le long de la charge, il n'est pas moins important de rechercher l'influence des diverses positions qu'elle peut occuper au fond de l'âme. Presque tous les auteurs ont attribué les dégradations que l'on observe dans les bouches à feu vers le logement des projectiles, à l'emplacement de la lumière à la partie supérieure de l'âme. Ils pensent généralement que le dégagement des fluides élastiques commençant dans la partie supérieure, le projectile est pressé sur l'arête inférieure avant d'être mis en mouvement. Par suite ils proposent de faire aboutir le canal de la lumière au centre même du fond de l'âme, afin d'augmenter la durée des canons. C'est dans le but de reconnaître les avantages de cette disposition qu'on a fait récemment à Douai, à Toulouse et à Strasbourg des expériences spéciales sur des pièces neuves de 24 et de 16. Une pièce avait sa lumière placée comme à l'ordinaire. Dans une deuxième, la lumière aboutissait au centre du fond de l'âme et formait avec l'axe un angle de 30° environ ; enfin dans une troisième on avait supprimé le bouton de

culasse et percé le canal de lumière dans la direction même de l'axe. Ces pièces ont été tirées comparativement, et leurs dégradations successives observées avec une grande exactitude. On a trouvé que la pièce ordinaire n'avait subi que de très légères dégradations tandis que les autres pièces étaient mises hors de service en un très petit nombre de coups.

Voici un tableau des résultats obtenus dans les trois écoles d'artillerie où ces expériences ont été faites :

Position de la lumière.	*Logements Observés.* à Strasbourg, sur un canon de 24.	à Toulouse, sur un canon de 24.	à Douai, sur un canon de 16.
lumière dans l'axe	37 points après 40 coups	23 points après 6 coups 25 points après 30 coups	8 points après 6 coups 17 p. après 30 coups 24 p. après 60 coups
lumière inclinée à 30° sur l'axe	34 points après 60 coups	14 points 1/2 après 6 coups 33 points après 30 coups	14 p. après 30 coups 25 p. après 90 coups
lumière ordinaire	. . . . . .	3 points après 30 coups	3 p. après 60 coups 4 p. après 90 coups

On a été surpris d'un pareil résultat et l'on n'a su à quoi attribuer la cause d'un fait, qui doit être regardé comme incontestable, puisque dans aucune expérience d'artillerie on n'a obtenu un accord aussi parfait, dans trois lieux différens. Cependant, d'après la maniere dont l'inflammation de la poudre s'opère et celle dont les gaz agissent on peut se rendre compte de ce résultat. En effet, dans les canons ordinaires les gaz se développant dès les premiers instans, près du vide que le poids de la gargousse établit dans la partie supérieure de l'âme, ils se répandent librement dans ce vide, s'y élèvent à une moindre tension, puisqu'ils ont plus d'espace à occuper, peuvent agir plus tôt sur le projectile, et ils l'ont déjà déplacé lorsque la densité des gaz atteint son maximum, avant même que la plus

petite partie de la charge soit en combustion. Dans les deux cas où la lumière aboutit au centre du fond de l'âme les gaz ne peuvent se développer dans le vide supérieur, ils ne trouvent d'espace libre que dans les interstices des grains de la charge, ils s'y répandent en conservant une tension beaucoup plus grande, et accélèrent ainsi l'inflammation de la charge. Il en résulte alors que le boulet n'est mis en mouvement que plus tard et vers une époque plus rapprochée de celle où le maximum de densité des gaz se manifeste. On peut remarquer que dans le cas des lumières inclinées à 30° sur l'axe, les dégradations sont un peu moins rapides. Il est difficile de se rendre compte de ce fait d'une manière satisfaisante, et on ne peut guère l'attribuer qu'au sens de l'inflammation qui, en suivant la direction de la lumière, vient aboutir plus vite aux parois de l'âme que dans l'autre cas.

Vent.

Nous avons déjà vu quelles sont les conditions qui nécessitent dans les bouches à feu l'existence du vent, ou de l'excès du diamètre de l'âme sur le projectile. Pour les pièces de siége, le vent a été fixé à 18 points et pour les pièces de campagne à 12 seulement. Le vent du mortier éprouvette n'est que de 9 points, celui des mortiers de 12 pouces est de 18 points, tandis que celui des autres mortiers et des obusiers de Gribeauval n'est que de 12 points. Enfin dans les nouveaux obusiers le vent a été porté à 1mm1/2 pour l'obusier de montagne, à 2 millimètres pour les autres obusiers de bronze et à 3mm pour celui de fonte. Il est évident que la lumière et le vent doivent influer sur la vitesse initiale du projectile, puisque les gaz qu'ils laissent échapper ne contribuent plus en rien à l'accélération de son mouvement. Il faut donc que le vent du boulet soit le plus petit possible, tout en lui permettant de se mouvoir facilement dans l'âme malgré les bandelettes qui le relient au sabot, la crasse que laisse la poudre et l'excès de diamètre de 6 à 9 points qu'il peut prendre quand il est chauffé au rouge.

Pour évaluer la perte de gaz qui provient du vent du boulet, Euler a supposé que les gaz s'échappaient par le vide existant autour du projectile avec une vitesse égale à celle dont le projectile est lui même animé. En partant de cette hypothèse il a trouvé que

si u est la vitesse du boulet quand il n'y a pas de vent et v cette même vitesse quand le vent existe, le rapport de la lunule du vent à la surface de l'âme étant égal à $\frac{1}{m}$ on a

$$\frac{v}{u} = 1 - \frac{3,9506}{m} + \frac{2,9683}{m_2} - \frac{1,5865}{m^3} + \&^{a}$$

Cette formule ne peut être regardée comme très-exacte, parce qu'elle suppose que le vent est tout-à-fait libre, tandis que les bouchons, sabots, bandelettes et sachets l'obstruent en partie.

Hutton a trouvé dans ses expériences que la perte de vitesse qui résultait d'un vent de 1/34 sur un calibre de 2, 20 de diamètre était de 1/11; pour un vent de 1/20, il a trouvé cette perte de 1/7 et de 1/4 pour un vent de 1/12.

Depuis Hutton, on a renouvelé ces expériences et l'on a reconnu qu'un canon de 12 ne portant que 3/4 de ligne de vent et chargé au 1/4 du poids du boulet donnerait la même vitesse initiale qu'une autre pièce de 12 chargée au 1/3, mais portant un vent de deux lignes. Enfin dans les pièces de 24, un quart de la vitesse initiale du projectile est perdu par le vent et par la lumière.

Il est possible de calculer la perte des gaz qui s'échappent par le vent et par la lumière. Si nous remarquons que les gaz s'échappent avec une vitesse qui ne nous est pas connue, mais qu'on peut représenter par n fois la vitesse du projectile, L étant la surface de section du canal de la lumière, la quantité de gaz perdu par ce canal sera pour l'unité de temps L $n\,v$. La vitesse avec laquelle les gaz s'échapperont par le vent lorsque le boulet sera en mouvement sera la différence entre la vitesse propre des gaz et celle du boulet ou $nv - v$: et si V est la surface du vent nous aurons pour la quantité de gaz perdue par le vent $v\,(n-1)$ V.

La quantité totale des gaz perdue dans l'unité de temps sera donc représentée par L$n\,v + (n-1)\,v$ V.

Maintenant si on veut tenir compte de cette perte de gaz, il faut la retrancher de la somme des gaz qui agissent derrière le boulet, pour lui communiquer le mouvement dont il est animé. Il faut donc modifier la valeur de la tension qui est en raison inverse de l'augmentation du volume livré à l'expansion des gaz par suite de la perte par le vent et la lumière. En représentant par θ la distance du projectile à la culasse au bout du temps t, par α la longueur de

la charge, θ sera la longueur d'âme dans laquelle les gaz pourront se dégager au bout du temps t et au lieu de la valeur générale

$$\rho = \frac{\left\{1 - \left(t - \frac{t}{t'}\right)^3\right\} D\,\alpha}{\theta - \left(1 - \frac{t}{t'}\right)^3 \frac{D\alpha}{\delta}}.$$

Nous aurons la valeur modifiée

$$\rho = \frac{1 - \left(1 - \frac{t}{t'}\right)^3}{\theta - \left(1 - \frac{t}{t'}\right)^3 \frac{D\alpha}{\delta} + \left(\theta - \alpha\right)\left\{n\,L + \left(n - 1\right)V\right\}}$$

si on suppose que pendant le temps t le rapport n reste sensiblement constant, ainsi que cela a lieu au commencement du mouvement.

En effet, la densité diminue, par suite des pertes de gaz par la lumière et par le vent, comme si la capacité de l'âme était augmentée du volume de ces gaz, qu'on a vu être égal à

$$v\left\{n\,L + (n - 1)V\right\} = Cv;$$

mais l'espace en arrière du projectile, qui croit comme v, s'allonge de $(\theta - \alpha)$; le volume des gaz perdus, qui varie comme Cv, devra donc devenir égal à C $(\theta - \alpha)$ après le même temps t. Par suite ces gaz empliraient dans l'âme, en prenant la section de celle-ci pour unité de surface, une longueur

$$(\theta - \alpha)\left\{L\,n + (n - 1)\ V\right\}$$

à reporter comme nous l'avons fait dans la valeur de ρ.

Il en serait absolument de même si on voulait tenir compte des dilatations de l'âme quelles qu'elles fussent; il faudrait, comme nous venons de le faire, introduire l'expression des volumes additionnels, produits par ces dilatations, dans le dénominateur de l'expression qui représente la densité des gaz.

Longueur d'âme.

La petite vitesse de combustion des anciennes poudres non grenées, avait fait croire que les plus longues pièces donnaient les

plus longues portées; ce préjugé semblait justifié par l'expérience, parce que le boulet était soumis plus longtemps à l'action des gaz qui se développaient assez lentement, et que de la plus ou moins longue durée de son trajet dans l'âme, dépendait la plus ou moins grande partie de la charge dont il avait à supporter l'action. Cette opinion sur la longueur des pièces s'est conservée jusqu'après le changement de fabrication de la poudre et malgré les nombreux démentis que l'expérience avait déjà donnés à ce principe. Ainsi diverses pièces fort longues avaient gagné en portée lors qu'on en eut diminué sensiblement la longueur. Une couleuvrine de 45 calibres, par exemple, réduite à 33 avait gagné 600^m de portée. La couleuvrine de Gênes qui avait 58 calibres de longueur d'âme, étant réduite successivement à 50, 44 et 43 calibres gagna constamment jusqu'à ce dernier point où elle avait atteint un excès de portée de 2000 pas. Enfin l'on avait remarqué déjà que la couleuvrine de Nancy qui avait 48 calibres de longueur ne portait pas aussi loin que les pièces ordinaires.

En 1736 pour la première fois, le colonel Armstrong s'est occupé en Angleterre, d'expériences sur la longueur d'âme des bouches à feu; il a opéré sur des pièces de 24 en bronze chargées au 2/3 du poids du boulet et dont il a fait varier la longueur de six pouces en six pouces depuis 10 pieds 6 pouces. Voici les portées moyennes évaluées en yards (0^m,914) qu'il a obtenues dans le tir comparatif de ces différentes pièces :

Longueurs d'âme	10^{pi}6^{po},	10^{pi},	9^{pi}6^{po},	9^{pi},	8^{pi}6^{po},	8^{pi}.
Portées moyennes (yards)	2502,	2512 2/3,	2564 1/3,	2617 2/3,	2514,	2453 2/3.

De ces expériences il résulte évidemment qu'avec les pièces très-longues dont on diminue successivement la longueur, les portées vont en augmentant jusqu'à un certain point où la variation de portée reprend en sens inverse et diminue. On comprend facilement la raison de ce fait, parce que l'effet d'une pièce ne peut augmenter avec le temps d'action des gaz qu'autant qu'il n'y a aucune cause de perte de vitesse; si, d'ailleurs, l'on supposait une pièce assez longue, pour que le boulet en la parcourant, atteignit un point où la tension des gaz qui le pressent par derrière, deviendrait inférieure à la pression atmosphérique qui agit sur la partie antérieure, on voit que le boulet tendrait à reculer dans l'âme jusqu'à ce

que l'équilibre fût établi ; mais il est évident que bien en deçà de la longueur d'âme que présenterait ce résultat la longueur de la bouche à feu doit être nuisible au mouvement du projectile à cause des battements de ce projectile contre les parois, et des pertes successives de vitesse que ces battements lui font éprouver ; si d'ailleurs les pièces sont en très-bon état et sans battement, la vitesse du projectile doit être peu diminuée. Les expériences du colonel Armstrong firent voir que les longueurs d'âme les plus favorables étaient comprises entre 9pi 6po et 9 pieds.

Hutton en opérant sur un canon du calibre de 1liv. et d'une longueur qu'il a fait varier de 15 à 40 calibres a trouvé que les vitesses initiales augmentaient comme les racines cinquièmes des longueurs.

Le chevalier d'Arcy en se servant d'un canon de fusil du calibre ordinaire dont il a fait varier la longueur, depuis 3 calibres 1/2 jusqu'à 108 calibres a trouvé que c'était comme les racines quatrièmes des longueurs que la vitesse augmentait ; et les expériences faites en 1815, en Angleterre, ont confirmé ces dernières relations. Ces résultats de calcul peuvent être vrais tant que les bouches à feu que l'on emploie sont en très-bon état, mais dans la pratique ils ne sont pas rigoureusement applicables comme l'ont prouvé les expériences de l'an XI et ce n'est que par tâtonnement que l'on peut déterminer l'influence des longueurs d'âme.

Depuis les expériences du colonel Armstrong on en a fait de nouvelles à Hanovre en 1785 sur des canons des calibres de 12, 6 et 3 de 16, 18, 21, 22, 23 et 24 calibres de longueur, pour terminer celle qui était la plus convenable dans le tir à la charge de 1/2 du poids du boulet, les portées furent mesurées au pas de 2pi 2/3 (le pied de Culembourg valant 0,m29212) et la moyenne fut prise sur 15 coups par inclinaison différente.

Voici le tableau des résultats obtenus pour chaque calibre en particulier :

Calibre de 12.

Longueurs d'âme	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Angle de tir de 1°. Portées	953pi	»	»	978pi	»	»	982pi	»	802pi
id. 2°. id.	1348	»	»	1401pi	»	»	1280pi	»	1299pi
Sommes des portées	2301pi	»	»	2379	»	»	2262	»	2101

Calibre de 6.

Longueurs d'âme.

Angle de tir $=\frac{1^o}{6}$: Portées	600pi —	459pi -	578pi -	530pi -	» - » -	492pi - » -	533pi
—id.— $=1^o+\frac{1}{6}$ Portées	873 —	941 -	932 -	925 -	» - » -	990 - » -	829
—id.— $=2^o+\frac{1}{6}$ —id.—	1285 —	1314 -	1290 -	1264 -	» - » -	1278 - » -	1154
Sommes des portées . . .	2758 —	2714 -	2800 -	2719 -	» - » -	2760 - » -	2516

Calibre de 3.

Angle de tir $=\frac{1^o}{6}$ Portées	415 —	424 -	427 -	411 -	» - » -	446 - » -	391
—id.— $\times 1^o+\frac{1}{6}$ —id.—	748 —	903 -	785 -	825 -	» - » -	810 - » -	715
—id.— $=2^o+\frac{1}{6}$ —id.—	1115 —	1117 -	1109 -	1035 -	» - » -	1150 - » -	988
Sommes des portées. . .	2278 —	2444 -	2321 -	2271 -	» - » -	2406 - » -	2094

On voit d'après ces trois tableaux que les portées ne varient pas beaucoup de 18 à 24 calibres et qu'au-delà de cette limite, des longueurs plus grandes seraient plutôt nuisibles qu'utiles, quand on emploie des charges de la moitié du poids du boulet. Si on tirait à plus fortes charges, des plus grandes longueurs pourraient être préférables, quoique les pièces de 24 à la charge des 2/3 aient donné d'aussi grandes portées à 18 calibres qu'à 23.

Hutton dans ses expériences sur des canons de 1liv de 15, 20, 30 et 40 calibres de longueur a trouvé, pour ces canons, que les plus longs donnaient toujours les plus grandes portées ; mais il faut apprécier exactement la valeur de 40 calibres de son canon pour ne pas se laisser surprendre par le désaccord apparent de ces expériences avec celles de Hanovre. Ces 40 calibres ne correspondent en effet qu'à une longueur de six pieds environ, qui n'appartiendrait qu'à un canon court des calibres en usage à la guerre. Il en est de même du fusil sur lequel a opéré le chevalier d'Arcy et qui a 65 calibres de longueur. Or les projectiles des fusils et des canons portant à peu près avec les mêmes vitesses initiales, et les balles ayant même l'avantage sous ce rapport, le temps qu'ils mettent à parcourir des longueurs égales est à peu près le même, et cette longueur absolue évaluée en calibres est tout-à-fait différente. Il

en résulte que dans un canon de 24 lorsque le boulet aura parcouru la longueur de 21 calibres de l'âme, la partie de la charge brûlée ne sera pas portionnelle à la charge aussi brûlée, quand la balle de fusil sera arrivée au 21e calibre de la longueur d'âme du fusil. Les parties de charge brûlées lorsque des projectiles différents sont arrivés à la même distance en calibre du fond de l'âme, étant tout-à-fait différentes, il faut tenir compte de la longueur d'âme des bouches à feu, non seulement en calibres, mais encore en unités linéaires, lors qu'on veut comparer entre eux les effets qu'elles produisent.

Nous avons parlé déjà des expériences de l'an XI sur les longueurs d'âme à donner aux bouches à feu. Les tableaux suivants font connaître les résultats obtenus dans ces expériences.

Canon de 24 tiré au 1/3 du poids du boulet.

Longueurs d'âme	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
Sommes des portées de 0° à 6° moyennes de 70 coups.	4556t	4396t	4415t	4329t	4195t	4305t	4128t	4060t	4075t	3915
Sommes des portées de 1° à 10° moyennes de 100 coups.	9536	9532	9479	9488	9180	9297	8961	8932	8729	8550

Les plus grandes portées correspondent comme on le voit à 19 et 20 calibres.

Pour déterminer l'influence des charges on tira les mêmes pièces sous l'angle de 3°. Voici le tableau des résultats obtenus :

Portées aux charges de 6 liv.	650t	674t	619t	618t	606t	609t	575t	577t	566t	545
8 . .	695	687	691	666	659	689	650	624	658	597
12 .	732	745	728	735	710	716	650	679	695	644
Sommes des portées	2077	2106	2038	2019	1975	2014	1875	1880	1919	1788

Les résultats relatifs aux longueurs des pièces sont à peu près les mêmes que les précédens.

Canon de 6 tiré au 1/3 du poids du boulet.

	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11t
Sommes des portées de 0° à 6° moyennes de 70 coups.	3713t	3628t	3731t	3546t	3609t	3590t	3491t	3532t	3477t	3346t
Sommes des portées de 0° à 10° moyennes de 100 coups	7933	7820	8068	7808	7782	7771	7561	7541	7746	7599

Dans ce cas les plus fortes portées correspondent à 18 calibres de longueur ; mais ce n'est qu'au dessous de 15 calibres que les portées diminuent sensiblement. Pour voir l'influence des charges on tira sous l'angle de 3°.

Portées aux charges de 1li ½	531t	578t	569t	571t	520t	576t	551t	517t	532t	491t
2 .	561	583	576	556	562	579	556	520	536	538
3 .	568	645	592	572	546	566	556	510	559	517
Sommes des portées	1660	1806	1737	1719	1628	1721	1663	1547	1627	1546

D'après ce tableau, ce n'est qu'au-dessous de 14 calibres que les portées commencent à diminuer.

D'après tout ce qui précède, on voit que les longueurs d'âme les plus favorables au plus grand effet sont généralement de 17 calibres pour la charge de 1/4, de 18 à 19 calibres pour la charge de 1/3 de 19 à 21 calibres pour la charge de 1/2. Pour la pièce de campagne, la longueur de 17 calibres a été adoptée, et pour les pièces de siége de 24 et de 16, on a pris 21 et 23 calibres de la longueur favorable au plus grand effet, pour être plus légères et plus maniables, et parce que les effets varient très-peu, comme on l'a vu, autour du maximum.

Comme dans le cas où les bouches à feu doivent lancer des projectiles creux, les circonstances du tir ne sont plus les mêmes, il a fallu recommencer les expériences que l'on avait faites pour les canons. On conçoit en effet que dans ce cas l'âme des bouches à feu ayant un plus grand diamètre, et le projectile offrant à l'action de la poudre une surface généralement beaucoup plus grande que les boulets, en même temps qu'il se trouve animé d'une vitesse moindre, on peut sans inconvénient diminuer la longueur de l'âme.

En l'an XI on a fait des épreuves sur des pièces de 24 destinées à lancer des obus ou boulets creux de calibre. On a fait varier la longueur d'âme de la bouche à feu depuis 11 jusqu'à 16 calibres et on a trouvé que les vitesses initiales allaient toujours en augmentant jusqu'à cette limite. Voici le tableau des résultats obtenus avec des charges de 1/3 à 2/9 pour les boulets creux correspondans à 1/4 et 1/3 du boulet plein.

Longueur d'âme en calibre		16	15	12	11
Portées sous l'angle de 3° à la charge de 6 liv.	Boulet creux de 18 liv.	619t	»	542t	539t
	Boulet de 25 liv.	606	»	566	547
Portées sous l'angle de 3° à la charge de 8 liv.	Boulet creux de 18 liv.	»	648t	657t	609
	Boulet de 25 liv.	»	689	658	597

On remarque comme vérification de ce qui précède que les obusiers de Gribeauval dont la longueur n'est que de 3 calibres seulement, ne sont pas susceptibles de produire un effet comparable à celui des obusiers du nouveau modèle dont la longueur est d'environ 10 calibres et qui, à cause de leur longueur, peuvent recevoir une plus forte charge. De même l'obusier de siége nouveau, a des portées moindres que celui de côte du même système qui offre une longueur de 9 calibres 1/2.

Les expériences faites depuis en Prusse sur des obusiers variant de longueur de 4 à 7 calibres ont aussi établi que la vitesse augmente avec la longueur d'âme. Cependant on a reconnu qu'avec de faibles charges comme de 1/9 du poids du projectile, il n'y avait pas d'avantage à donner aux obusiers plus de 7 calibres de longueur d'âme, avec 1/4 il serait bon de leur donner 9 calibres.

Charges.

La question de la détermination des charges de plus grand effet est intimement liée à celle qui vient de nous occuper. Un principe analogue à celui qui a long-temps été adopté pour les longueurs d'âme, a de même été généralement suivi pendant fort longtemps pour les dimensions des charges. Cependant il n'est pas vrai que plus la charge est forte plus l'effet obtenu est grand. En effet, quand la charge est plus considérable, l'emplacement qu'elle occupe est plus grand, et le projectile est soumis moins de temps à l'action des gaz, puisque les premières parties de gaz dégagées déplacent le projectile et le poussent en avant. Si la charge est longue, il y en aura une forte partie qui sera encore intacte lorsque le projectile aura franchi la bouche de la pièce, à cause de la lenteur de l'inflammation. Ainsi, à la limite, si le boulet était placé contre une charge qui viendrait aboutir à la bouche de la pièce, il tomberait dès le premier instant sans produire aucun effet. Ainsi donc en faisant des expériences pour constater la valeur des charges de plus grand effet, on devrait partir d'une charge très-forte et la diminuer jusqu'à ce que l'on obtînt l'effet maximum. On a fait des expériences sur des pièces de 36 de la marine, de 16 calibres de longueur et l'on a trouvé les résultats suivants :

Charges.	36^l	42^l	49^l	56^l	70^l	77^l
Vitesses initiales (en pieds.) . . .	1320	1170	950	945	454	191

On voit, d'après cela, que l'excès de charge est aussi nuisible à l'effet produit que l'excès de longueur de la bouche à feu.

Anciennement les pièces tirées avec de la poudre non grenée comportaient des charges du poids de leur boulet : on a ensuite admis qu'il fallait diminuer les charges jusqu'à les réduire au 2/3 du poids du boulet, et, depuis 1740, on n'a plus tiré les canons qu'au 1/2 au plus. On pense généralement aujourd'hui que les charges de 1/3 du poids du boulet sont suffisantes pour tous les cas qui peuvent se présenter.

Les expériences de 1740 furent faites à Strasbourg, sur la proposition de Bélidor ; on se servit de pièces de 24 qu'on tira à 45 degrés, et on obtint les résultats suivans que donnent les moyennes de deux coups seulement tirés à quelques jours de distance par charge différente.

Charges	8^l	9^l	10^l	11^l	12^l	13^l	14^l	15^l	16^l	18^l	24^l
Portées moyennes (toises).	2189	2425	2400	2069	2253	2468	2290	2279	2376	2355	2350

Il est probable qu'il y a eu quelques circonstances dont on n'a pas tenu compte dans ces expériences, d'ailleurs trop restreintes ; car on ne peut admettre qu'il se présente des sauts brusques de la charge de 9 liv à celle de 13 liv et que les charges intermédiaires produisent un effet beaucoup plus faible. Dans des expériences faites à Turin et à Malte on a reconnu que les portées variaient très-peu pour les charges de 9 liv à 18 liv. On voit par là qu'il est difficile de déterminer rigoureusement la valeur des charges de plus grand effet ; mais il est superflu de chercher à résoudre complètement cette question qui offre peu d'intérêt dans la pratique. Puisque les effets varient très-peu pour des charges notablement différentes, il est évident qu'il y a de l'avantage à préférer les charges qui produisant des effets sensiblement égaux, qui consomment beaucoup moins de poudre et fatiguent moins les bouches à feu et les affuts. Les expériences faites à Turin ont établi que le recul, et par suite la fatigue des affuts, augmentaient rapidement avec les charges. Ainsi avec 14 liv on a obtenu un recul de 70 po, de 72 po avec 15 liv, de 74 po avec 16 liv et enfin de 100 pouces avec 18 livres.

De toutes les expériences qui ont été faites en divers lieux et à différentes époques on peut conclure que plus les pièces comptent de calibres dans leur longueur, plus la charge de plus grand effet

est considérable par rapport au poids du projectile. Cette charge peut être fixée ainsi : à moitié du poids du boulet, pour les gros canons de 19 calibres de longueur d'âme, et de 3/4 de ce poids pour les petits canons de cette longueur, quoique les portées augmentent très-peu pour des charges excédant la moitié du poids du boulet. Les plus petits canons ont leur charge de plus grand effet égale au poids du boulet, lorsqu'ils ont 27 calibres et elle peut aller au-delà pour de plus grandes longueurs ; mais comme anciennement les canons étaient fort allongés, il pouvait être avantageux d'employer des charges de 2/3 du poids du boulet.

Si l'on veut combiner ensemble les dimensions de l'âme et celles de la charge, on verra qu'en général la charge au 1/3 du poids du boulet et la longueur d'âme de 18 calibres sont les plus favorables ; la portée obtenue est un peu moins grande que celle qu'on pourrait obtenir à la rigueur, mais par cette combinaison on obtient des pièces plus légères et les affuts ont moins à souffrir. Quant aux pièces de campagne, on peut encore aller au-dessous de cette limite et ne leur donner qu'une longueur de 17 calibres.

On a fait également des expériences sur les charges du plus grand effet à donner aux pièces en fonte de la marine, et on a reconnu que la charge au 1/3 était la plus avantageuse, en ce qu'elle offrait une limite au-delà de laquelle le tir deviendrait dangereux pour les servans. Ces pièces sont du reste moins longues que les pièces de bronze, à cause du poids considérable qui résulte de la moindre ténacité du métal.

On a cherché aussi à déterminer les charges de plus grand effet à employer pour le tir des projectiles creux, et dans les expériences de l'an XI on a lancé des obus de 24 avec des charges allant en augmentant jusqu'à 1/3 du poids du projectile. En général il n'est pas nécessaire d'employer pour les projectiles creux des charges aussi fortes que pour les projectiles pleins. En 1830 on a fait des expériences nombreuses relatives à la détermination des charges des nouveaux obusiers. On a trouvé que pour l'obusier de côte en augmentant les charges depuis 2^{kil}. jusqu'à 5^{kil}., les portées allaient en augmentant ; mais vers ce point, les différences sont devenues presque nulles et par suite la charge de 5^{kil} est très-voisine de celle qui produirait l'effet maximum. Du reste à la charge de 3^{kil} cet obusier donne toute la portée nécessaire pour la défense des côtes.

Pour les autres obusiers nouveaux, les charges adoptées par suite des ces expériences ont été: pour les obusiers de campagne de 10 calibres 1/2 de longueur d'âme, 1/8 du poids de l'obus, pour l'obusier de siége de 3 calibres 1/2, 1/11 du poids de l'obus, et enfin pour l'obusier de montagne de 6 calibres 1/2, 1/14 du poids de l'obus.

Épaisseur des Bouches à feu.

Les épaisseurs de métal des bouches à feu en usage à la guerre étaient anciennement de 1 calibre près de la lumière, de 1/8 de calibre près des tourillons et de 1/2 près de la bouche, à la partie la plus faible de la pièce. Toutes ces proportions ainsi fixées pouvaient varier de 1/8 en plus ou en moins, suivant que les pièces étaient destinées à tirer avec de fortes ou de faibles charges. Elles prenaient alors le nom de pièces renforcées ou amoindries. A l'époque où ces épaisseurs de métal étaient adoptées, on tirait à charges très fortes et supérieures le plus souvent au poids du projectile. Plus tard lorsque l'on perfectionna la fabrication de la poudre et qu'on prit le parti de la grener, les charges furent réduites aux 2/3 du poids du projectile, et cette proportion fut conservée pendant longtemps. On fit varier dans le même sens les épaisseurs de métal; celles-ci dans le système de Vallières, furent fixées de la manière suivante: 1 calibre à la lumière, 5/6 près et en arrière des tourillons, 17/24 à la naissance de la volée et 11/24 à la partie la plus faible de la volée.

En 1740, Bélidor fit opérer un nouvel affaiblissement des charges qui furent réduites à 1/2 du poids du projectile, sans qu'on changeât rien aux épaisseurs de métal adoptées précédemment. Gribeauval en 1765, réduisit encore les charges jusqu'au 1/3, et pour obtenir des pièces de bataille plus légères et plus faciles à transporter, il fixa l'épaisseur de métal aux proportions suivantes: 19/24 du calibre à la lumière, 2/3 aux tourillons, 1/2 à la naissance de la volée et 3/8 à la partie la plus faible. Ces épaisseurs déterminées par tâtonnement sont de beaucoup supérieures à celles qui sont données par l'application des différentes formules que nous avons établies.

On a cherché à baser la construction des bouches à feu sur la considération de la tension et de l'expansion des gaz de la poudre;

on a donc supposé que tous les gaz étaient produits dès le premier instant de la combustion et l'on a appliqué immédiatement la loi de Mariotte, en supposant les tensions proportionnelles aux densités. Par suite on a donné la même épaisseur à tout le pourtour de la charge; quand le boulet a franchi une longueur d'âme égale à celle de la charge, les gaz occupant un volume double du premier ont, en vertu de l'hypothèse admise, une densité moitié moindre, et par conséquent une tension moitié moindre; de là résultait, en ce point, une épaisseur de métal, moitié de celle du pourtour de la charge; en continuant à raisonner de la même manière, on a déterminé la courbe génératrice de la surface extérieure de la bouche à feu. Cette courbe ainsi construite s'abaisse très-rapidement vers l'axe de la pièce, et les épaisseurs de métal deviennent presque nulles à la volée. Si d'ailleurs on voulait partir de la bouche en lui donnant une épaisseur raisonnable, on arriverait pour le pourtour de la charge à des épaisseurs exagérées; ce mode de tracé convient d'autant moins que c'est presque toujours par la volée que les pièces de bronze périssent.

Nous allons voir comment on peut appliquer aux canons de bataille et aux nouveaux obusiers les formules qui ont été établies plus haut.

Si on suppose un canon de campagne, de 12 par exemple, tiré avec de la poudre ordinaire des pilons et une charge du 1/3 du poids du projectile, on trouve que lorsque celui-ci est déplacé de 0m05 les gaz ont atteint leur densité maximum qui est de 0,58. En substituant cette valeur dans la formule de Rumfort on trouve ainsi 1500 atmosphères pour valeur moyenne de la tension des gaz et 1800 atmosphères pour valeur de la tension près de la lumière; si on se sert d'une autre poudre que celles des pilons, de celle qui est triturée dans les tonnes, par exemple, et qui est plus vive, la pression moyenne des gaz est de 1800 atmosphères, et la tension maximum près de la lumière de 2100 atmosphères. Si enfin on emploie la poudre des meules qui est encore plus vive, la tension moyenne est de 1900 atmosphères et la tension près de la lumière est de 2200; on peut même obtenir avec la charge au 1/3 une tension moyenne de 2100 et de 2450 atmosphères à la lumière.

Quand la charge est de 1/2 du poids du projectile la tension moyenne obtenue avec la poudre des pilons est de 2100 atmosphè-

res, et la tension à la lumière de 2500 atmosphères avec les poudres les plus vives; on peut obtenir à cette charge jusqu'à 3400 atmosphères.

Or, en calculant l'augmentation de vîtesse initiale que fournit une augmentation de tension de 100 atmosphères, on trouve que pour des vîtesses de 450 à 500 mètres,cette augmentation n'est que de 6 à 8 mètres; par conséquent, lorsque dans la pratique on veut augmenter l'effet de la poudre, on augmente incomparablement plus la tension des gaz à l'instant du maximum de tension, et si le métal est mou comme le bronze, on détermine la formation de refoulements très-forts qui peuvent aller jusqu'à 8 lignes et des crevasses finissent par se déclarer. Cette dilatation de 8 lignes du pourtour de la charge, correspond à-peu-près au maximum d'allongement que le bronze peut atteindre sans perdre son élasticité; cela indique pourquoi les pièces se crevassent lorsque le pourtour de la charge a atteint cette limite de dilatation. Dès que les crevasses se sont manifestées, la surface d'action des gaz augmente sensiblement, la surface de résistance diminue d'autant, et la crevasse se propage rapidement, jusqu'à ce qu'elle ait atteint la surface extérieure.

Si la pièce est en fonte, les crevasses peuvent commencer à se déclarer beaucoup plustôt, parce que ce métal est moins tenace que le bronze. Dès que l'élasticité de la fonte est vaincue, les crevasses peuvent exister, et cela, quand bien même la pièce aurait une épaisseur de parois indéfinie. On voit par là que le métal le plus avantageux est celui qui peut s'allonger le plus sans s'écraser. La fonte ne possédant cette qualité qu'à un faible degré, on peut prévoir que quand on tire les pièces de fonte avec de très-fortes charges, il doit arriver un moment où ces pièces éclateront. On voit même que des pièces qui ont résisté à de très-fortes charges, peuvent ensuite éclater avec une charge beaucoup plus faible, parce que l'action de cette faible charge a suffi pour servir de complément à l'effet destructeur des charges précédentes. L'expérience a prouvé que dans les pièces en fonte les fissures sont imperceptibles, parce qu'elles s'ouvrent au moment de l'explosion, et se referment immédiatement sans cesser d'augmenter à chaque coup. C'est ainsi qu'à Esquerdes, une pièce de 30 vérifiée et trouvée en bon état, a éclaté au bout de deux coups tirés à faible charge. Il

est impossible de reconnaître l'état intérieur des bouches à feu en fonte, et, par suite, d'éviter les accidents qu'entraîne la rupture de la pièce; tandis qu'avec les pièces de bronze, on est averti, par leur altération progressive, de se tenir sur ses gardes. Il est arrivé néanmoins à Vincennes, en 1827 et 1828, que des pièces de campagne, tirées avec de la poudre des tonnes, ont éclaté à l'improviste. On a pensé d'abord que cet accident provenait de la qualité du bronze; mais on a reconnu qu'il ne fallait l'attribuer qu'aux dégradations du pourtour de la charge.

Si on compare l'étendue de la surface de rupture du premier renfort d'un canon de 12, par exemple, et celle de la surface intérieure sur laquelle agissent les gaz, pour déterminer cette rupture, on trouve que ces deux surfaces sont dans le rapport de 3 à 2; la ténacité du bronze étant égale à 2400 atmosphères il faudra une tension de 3600 atmosphères pour causer la rupture du premier renfort. Mais comme la poudre ne peut produire au maximum qu'une force de 3450 atmosphères, il en résulte que les épaisseurs données à ces canons sont plus que suffisantes pour leur permettre de résister aux tensions les plus fortes qui peuvent s'y développer. Il ne faut pas oublier cependant qu'à mesure que le tir se continue, le diamètre intérieur augmente, et les battements diminuent encore les épaisseurs du métal et que par conséquent la bouche à feu peut, à la longue, arriver à un point où elle éclatera. Comme avec la poudre ordinaire des pilons la tension maximum n'est que de 2300 atmosphères, il en résulte que les canons en usage ont une épaisseur une fois 1/2 plus grande que celle qui leur est nécessaire pour résister.

Les bouches à feu de campagne ne crèvent que dans des cas extraordinairement rares, mais cela peut se présenter plus fréquemment dans les pièces de siége. Dans celles-ci la surface de rupture du premier renfort est à la surface de la section intérieure sur laquelle agissent les gaz comme 20 est à 11; par conséquent l'épaisseur du métal est à très-peu près double de ce qu'elle devrait être pour résister. En effet, le rapport 3/2 que nous avons trouvé plus haut est relatif aux pièces de campagne de l'an XI, pour lesquelles la résistance du premier renfort est égale à 3600 atmosphères; mais puisque dans les pièces de siége on trouve le rapport 20/11 entre la surface de rupture et la surface d'action et que 2400

atmosphères représentent la ténacité du bronze, il faudrait aux gaz une tension de 4800 atmosphères pour faire éclater la pièce dès les premiers coups.

En considérant de même les épaisseurs de métal en avant du premier renfort, on trouve qu'à la naissance du 2e renfort elle est 4 fois et près de la volée 6 fois plus grande qu'elle ne devrait être à la rigueur, pour résister à la tension des gaz.

Quand on fait la même comparaison pour les pièces de fonte, on trouve que leurs épaisseurs sont trop faibles, bien qu'elles surpassent celles des pièces de bronze; cela tient à ce que la ténacité de la fonte n'est que de 1500 atmosphères à la température de 80°. En comparant comme pour les pièces de bronze la surface de rupture à la surface d'action, on trouve que le métal n'a que 1/4 en sus de l'épaisseur qui lui est nécessaire pour résister à la tension des gaz; il en résulte que ces pièces peuvent éclater facilement, aussi ne doit-on jamais tirer les pièces de côte qu'avec des charges de 1/3 du poids du boulet, lorsqu'on emploie des poudres ordinaires, et il faut avoir grand soin de diminuer les charges quand on se sert de poudres vives. Du reste comme les pièces de fonte n'ont pas de logement du boulet et qu'il ne s'y manifeste jamais à la place du logement qu'une légère dépression de 2 à 3 points, il ne se forme pas de battement et par suite les épaisseurs de la volée peuvent être différentes de celles qu'on est obligé d'adopter pour les bouches à feu en bronze.

Tout ce qui vient d'être dit n'est applicable qu'aux 1er et 2e renfort. Les épaisseurs de la volée doivent être calculées d'après d'autres considérations.

Dans les épreuves qu'on fait subir aux pièces en fonte de la marine, on se sert de charges qui n'ont pas moins d'un mètre de longueur et on introduit dans l'âme de la pièce jusqu'à 13 boulets placés à la suite l'un de l'autre et dont le dernier vient presqu'effleurer à la tranche de la bouche; on conçoit facilement que la masse à chasser se trouvant plus considérable, elle met plus de temps à entrer en mouvement et que, par suite, les gaz qui se développent, dans un espace plus rétréci que dans le cas ordinaire, acquièrent une tension beaucoup plus grande. Dans ce genre d'épreuve par laquelle la pièce est dite poussée à bout, elle tire jusqu'à 50 et 52 coups de suite et la fonte avec laquelle a été coulée la pièce qui a résisté est de réception.

Connaissant la vitesse d'un projectile on peut calculer la pression qui l'a mis en mouvement, et l'on a fait à Paris des expériences à l'aide du fusil pendule, pour déterminer les augmentations de tension que les gaz éprouvent quand on augmente le nombre des projectiles. On a chargé le fusil de 5 grammes de poudre et successivement de 1 jusqu'à 13 balles. On a obtenu ainsi pour les accroissements de tension la série des nombres suivants qui peuvent s'appliquer au chargement semblable avec les canons de la marine :

Nombre de boulets												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Valeur des tensions												
2500	2700	2880	2875	2920	2950	2975	3000	3010	»	»	»	3040

On voit par là que la tension des gaz pour un seul projectile est à celle qui correspond à 13 projectiles, dans le rapport de 25 à 30. Comme les pièces de côtes tirent très-souvent avec deux boulets, les expériences précédentes servent à déterminer la ténacité maximum dont la pièce doit être douée.

Dans les bouches à feu en bronze, les épreuves de réception ne sont pas les mêmes à cause de la qualité du métal qui se refoule facilement ; on se contente de tirer cinq coups avec une charge plus forte que la charge ordinaire et la pièce qui a bien résisté se trouve de réception.

Dans le nouvel obusier de côte, on a déterminé les épaisseurs de métal en supposant que cette bouche à feu ne tirerait qu'avec une charge maximum de 3 kil 5 ; cependant dans les épreuves qu'on lui a fait subir, l'obusier a pu tirer assez longtemps avec une charge de 5kil, son épaisseur est moyennement double de celle qui serait strictement nécessaire.

Dans les bouches à feu qui ont une chambre cylindrique, il y a un ressaut brusque de métal et par suite une augmentation du volume livré à l'expansion des gaz en arrière du projectile, bien plus rapide que dans les canons. Il en résulte que la tension maximum des gaz doit être moindre. C'est faute d'avoir tenu compte de cette différence de tension que les premiers modèles d'obusiers de 24, 6po et 8po avaient des épaisseurs beaucoup plus fortes que celles qui leur étaient nécessaires, et c'est en utilisant cette surabondance de métal qu'on a pu allonger et alléger ces bouches à feu ; quant à l'obusier court de 8po il se trouvait dans un cas particulier,

et nous examinerons plus loin les raisons qui ont motivé la répartition du métal de cette bouche à feu.

Épaisseur à la volée.

Nous avons vu plus haut que si l'épaisseur des pièces à la volée n'est pas suffisante, le choc du projectile peut briser la paroi de l'âme si le métal est cassant, ou former des battements qui finissent par ouvrir la volée. Nous avons vu aussi que le logement du boulet ne peut excéder 25 points sans qu'il y ait un mouvement désordonné du projectile, et nous avons calculé la série des efforts que les boulets peuvent exercer par leur choc le long de l'âme de 6 en 6 pouces, et évalué ces efforts en poids même du projectile; nous pouvons donc calculer les épaisseurs de métal correspondantes à ces efforts.

Avant d'aller plus loin, voici un fait observé à la fonderie de Toulouse, et qui peut servir à déterminer la loi de formation des battements. Une pièce de 24 chargée au 1/2 poids du boulet, a été tirée cinq coups de suite et l'état de l'âme observé avec soin après chaque coup. Comme le métal était assez mou, il s'est manifesté pendant ces cinq coups un logement et des battements qui se sont produits de la manière suivante :

Après le 3e coup il existait déjà un petit logement; par suite au 4e coup, le projectile a dû rencontrer la paroi supérieure de l'âme et y pratiquer un très-léger battement ; il y en avait effectivement un placé à 5pi 6po. Au 5e coup le logement était de 19 points et le pourtour de la charge avait en outre subi une dilatation de 12 autres points ; en sorte que le diamètre de l'âme au logement se trouvait augmenté de 31 points; de plus, il existait en avant de ce logement un bourrelet assez saillant, causé par le refoulement du métal. Alors le boulet, en partant de son logement, a dû suivre un plan incliné qui l'a dirigé immédiatement vers la paroi supérieure. Il l'a frappée en effet à 3po 10lig seulement en avant de sa position primitive et a fait, jusqu'à sa sortie de l'âme, 12 ricochets successifs, qui ont donné naissance à autant de battements très-forts. Le deuxième battement était à 4po 9lig du premier et la distance des battements successifs a ainsi augmenté jusqu'à 12 pouces qui a été constamment la distance des derniers. Dans le premier, le logement a été de 5 points, dans le deuxième de 6 points, dans le 3e

de 8, et ainsi de suite jusqu'à un logement de 9 points après lequel ils ont diminué de profondeur et sont revenus à 7 points seulement. Les battements ont commencé à diminuer à la naissance de la volée, et cette diminution tient à la diminution correspondante de l'angle d'incidence du projectile. On conçoit que de semblables ricochets n'aient pas toujours lieu dans l'âme des canons, et il peut arriver que si le boulet est lancé un peu obliquement il décrive une spirale le long des parois de l'âme.

Connaissant la vitesse du projectile et l'angle d'incidence sous lequel il vient frapper les parois de l'âme, on peut, à l'aide des formules sur la résistance des matériaux, déterminer les épaisseurs de métal capables de résister à l'effort du projectile ; mais on sait que ces formules qui ne peuvent subsister qu'à l'aide d'hypothèses particulières, sont bien loin d'être rigoureuses ; par suite les résultats obtenus ne peuvent être considérés comme indubitables.

En comptant les distances à partir de la tranche de la bouche et en les faisant varier de 6 pouces en 6 pouces jusqu'à quatre pieds où se trouve la naissance de la volée, on obtient les nombres suivants :

Distances du boulet.	0	6po	1pi	1pi6po	2pi	2pi6po	3pi	3pi6o	4pi
Diamètre du canon de 24 en millimètres.	270	279	287	295	302	312	321	330	340
Diamètres d'égale résistance calculés à l'aide des formules.	265	275	283	291	300	310	322	335	350

On voit que la pièce d'égale résistance est plus faible à la bouche que la pièce en usage, mais plus forte à la naissance de la volée.

Dans les projets de bouche à feu, comme il faut tenir compte de ce qui doit se passer dans la pratique et que les logements et battements peuvent acquérir jusqu'à une profondeur de 21 points il faut augmenter les épaisseurs à la volée de cette quantité afin que la formation des battements ne diminue pas trop la résistance de cette partie de la pièce. Par suite, pour la pièce de 24, les épaisseurs qu'elle devrait avoir seraient :

269	279	286	294	303	310	323	336	350

On voit d'après ce tableau que la pièce de 24 est parfaitement

proportionnée, bien qu'on ne soit arrivé à son tracé que par le tâtonnement. Il est donc permis de prendre, pour base du système d'épaisseurs à donner à la volée d'une bouche à feu en projet, les systèmes d'épaisseurs adoptés par Gribeauval.

Dans les bouches à feu en fonte, le logement du boulet ne devenant pas plus grand que 2 ou 3 points, il en résulte qu'il n'y a pas de forts battements à craindre et que les épaisseurs à la volée peuvent être beaucoup plus faibles. C'est pour cela que la volée des pièces en fonte est d'une forme conique plus prononcée que celle des pièces de bronze. Dans le nouvel obusier de côte on aurait pu donner à la volée des épaisseurs moindres que celles qui existent, mais on a préféré conserver à la pièce une forme ordinaire. En Suède où toutes les pièces en usage sont en fonte on a dû chercher à donner au système adopté la plus grande légèreté possible, et c'est pour atteindre ce but que l'on a construit des obusiers de siége ayant un premier renfort extrêmement épais, et une volée évidée d'une manière disgracieuse.

Lorsque le boulet vient frapper les parois à la bouche, comme le métal n'est soutenu en cet endroit que par les parties en arrière, les dégradations doivent être plus grandes ; il est donc important de renforcer le pourtour de la bouche et c'est ce qu'on a obtenu par le renflement du bourrelet, qui est en outre destiné à fixer avec la plate-bande de culasse l'inclinaison de la ligne de mire. Par un motif contraire, on voit que la culasse soutient parfaitement le métal qui forme le pourtour de la charge et qu'elle augmente considérablement la résistance.

Épaisseur au deuxième Renfort.

Il nous reste à considérer le 2e renfort qui porte les tourillons et les anses. Cette portion de l'âme a beaucoup à souffrir dans sa partie postérieure de la pression des gaz ; elle a moins à souffrir dans sa partie antérieure à laquelle, en revanche, les battements peuvent commencer à agir avec violence.

Les épaisseurs du 2e renfort sont très peu différentes à sa naissance et à son extrémité et comme il sert de jonction à deux parties de la bouche à feu complètement déterminées, on s'est toujours plus attaché à le raccorder avec elles qu'à lui donner des épaisseurs qu'il devrait avoir en réalité. Les tourillons à l'aide des

quels la pièce se trouve reliée à son affût, ont un très-grand effort à supporter au moment de l'explosion de la charge et pourraient être faussés ou même arrachés; c'est pourquoi il est important que la base de ces tourillons soit renforcée. Le 2e renfort tel qu'il est construit et bien qu'au dessous de ce qu'il devrait être, résisterait cependant assez bien si la coulée ne donnait pas aussi souvent lieu à des défauts dans le métal. On conçoit en effet que pour cette partie de la bouche à feu où il y a plusieurs saillies, le refroidissement s'opère autrement que dans les autres ; il en résulte des retraits inégaux du métal et par suite des fissures ou crevasses qui se manifestent vers les anses et vers les tourillons et qui rendent la pièce beaucoup moins résistante vers ces points.

Dans les épreuves des pièces en fonte chargées à 15 boulets, on remarque généralement que quand ces pièces éclatent c'est au 2e renfort que s'opère la rupture ; cela tient à ce que la charge vient aboutir précisément en cette partie, qui moins résistante que le 1er renfort, a pourtant alors la même pression à supporter.

Poids des Bouches à feu.

Le poids des premières bouches à feu a été très-variable et n'a été proportionné au calibre, que lorsqu'on a cherché à *établir* des systèmes complets d'artillerie.

Afin de présenter les différents poids adoptés successivement pour les bouches à feu, sous une forme qui permette de les comparer facilement, nous les donnerons dans un seul tableau exprimés en poids du projectile des différents canons dont on s'est servi en France, depuis les plus anciens jusqu'à ceux du système de Gribeauval.

Tableau.

Pièces anciennes lançant des boulets de pierre, . . .	doubles canons.	canons.	$^1/_2$ canons.	$^1/_4$ de canons.	$^1/_8$ de canons.	$^1/_{16}$ de canons.	
Poids des projectiles, . .	96 » »	48 40 32	24 20 16	12 10 8	6 5 4	3 2 $^1/_2$ 2	
Poids de la pièce exprimée en poids du boulet, ...	150 180	150 166	175 180	225	350	»	
Poids des pièces adoptées sous Charles IX et tirant à la charge de 2/3 du poids du boulet, .	»	160	180 220	235 250	360 380	» »	
Calibre des pièces adoptées sous Louis XIV et tirées au 1/2 du poids du boulet, ...	»	33	24	16	12	8	4
Poids, ...	»	190	215	255	285	245	325
Calibres du système de Vallières 1732. Pièces tirées au 1/2 du poids du boulet.	»	»	24	16	12	8	4
Poids.	»	»	225	264	266	265	288
Calibres du système de Gribeauval 1765, ... — Pièces de siége tirées au 1/2.			24	16	12	8	»
— pièces de bataille tirées au 1/3			»	»	12	8	4
Poids. . . . . — Pièces de siége			235	258	265	272	»
— pièces de bataille			»	»	150	150	150

Ces derniers poids ont été conservés jusqu'aujourd'hui, malgré les essais tentés l'an XI, pour substituer aux pièces anciennes, des pièces plus légères. Celles-ci fatiguaient tellement leurs affûts, qu'il a fallu revenir à celles qu'on voulait abandonner.

On peut établir la comparaison des poids des pièces de siége en usage en France et chez les principales puissances étrangères à l'aide du tableau suivant :

Calibres		36	30	24	18	16	12	8	6			
France	charge au 1/2	»	»	235	»	258	265	272	»	245		
	charge au 1/3	195	206	178	205	225	»	262	280	244	280	250
	pièce de côte	200			215	233	242	250	300	260	290	250
Prusse	charge au 1/2	»	»	285	»	»	300	240	»	240	»	
	charge au 1/3	»	»	235	235	»	»	»	»	»		
Piémont	charge au 3/8	»	»	246	»	»	275	»	320	»		
Hanovre	charge au 1/2	»	»	»	»	»	250	»	240	»		
	charge au 1/4	calibre de 42 175 calibre de 32. 195										
Angleterre	charge au 1/3	»	»	224	250	»	224	200	212			

Si l'on veut se rendre compte des effets du recul, il faut considérer la masse totale résultant de l'ensemble de la pièce et de son affût. Or, le poids des affûts étant connu, on sait que le rapport du poids du système de l'affût et de la pièce au poids du boulet est de

325	à	330	pour la charge de			1/2
336	à	385	—	id.	—	3/8
285	à	345	—	id.	—	1/3
250	à	325	—	id.	—	7/24
210	à	280	—	id.	—	1/4

Connaissant ces différents rapports et la vitesse initiale du projectile, on peut calculer la vitesse initiale de la masse totale du système de la pièce avec son affût. En effet m étant le poids du projectile et v sa vitesse initiale, M le poids du système et V la vitesse qu'il tend à prendre, nous avons vu qu'en supposant μ, poids de la charge très-petit par rapport à m on avait

$$\left(m+\frac{\mu}{2}\right)v+\left(M+\frac{\mu}{2}\right)V=0$$

pour la 1re. équation générale du mouvement dans le tir des bouches à feu.

De là on tire, en tenant compte du sens des deux mouvements inverses du projectile et du système,

$$\left(m+\frac{\mu}{2}\right)v=\left(M+\frac{\mu}{2}\right)V.$$

On voit qu'à l'aide de cette équation on peut déterminer M ou V à volonté; l'autre étant connue, si l'on veut connaître V ou la vitesse du recul pour chaque espèce de charge employée, il suffira

de remplacer μ par ses différentes valeurs $\mu = \frac{m}{4}, \frac{m}{3}, \frac{m}{2}$ et l'on aura successivement

$$V = \frac{9\,mv}{8\,M + m},\quad V' = \frac{7\,mv'}{6\,M + m},\quad V'' = \frac{5\,mv''}{4\,M + m}.$$

On peut encore à l'aide de cette formule calculer la masse M de manière que la vîtesse du recul soit la même pour chaque espèce de charge employée. En introduisant cette condition, nous aurons la suite d'équation

$$\frac{9\,mv}{8\,M + m} = \frac{7\,mv'}{6\,M' + m} = \frac{5\,mv''}{4\,M'' + m}$$ faisant $m = 1$, on aura $$\frac{9\,v}{8\,M + 1} = \frac{7\,v'}{6\,M' + 1} = \frac{5\,v''}{4\,M'' + 1}$$

Mais les vîtesses v, v', v'' étant entre elles comme les nombres 8: 100: 115, on aura $M' = \frac{5600\,M - 92}{4752}$ et ainsi de suite.

On trouve en supposant que pour la charge du 1/4, 200 est le poids du système de la pièce et de l'affût évalué en poids du boulet, qu'à la charge de 1/3 le poids du système devra être 290 fois celui du boulet.

A l'aide de la même formule et en partant du poids connu des pièces en usage, on reconnait que les canons de bataille tirant au 1/3, fatiguent proportionnellement plus leurs affûts que les canons de siége avec la même charge; mais ils les fatiguent moins à la charge de 1/4. C'est pour arriver à se servir de cette charge au 1/3 que Gribeauval s'est vu dans la nécessité de renforcer l'affût de ses pièces de bataille, avec de nombreuses ferrures.

Chez les Anglais, où les canons de bataille ne pèsent que 112 fois le boulet, la fatigue des affûts est beaucoup plus considérable encore. On peut conclure de tout cela que quand on veut égaler le poids du système à une quantité donnée, il vaut mieux augmenter le poids de la pièce que celui de l'affût et cela parce que plus la pièce est lourde par rapport à l'affût, moins il y a de force vive perdue dans la transmission du mouvement à l'affût, et on sait que cette force perdue est consommée au détriment de la machine. Il ne faut donc donner généralement à l'affût que le poids qui lui est nécessaire pour que les matériaux employés à sa construction, puissent résister, et répartir le reste du poids sur la masse de la bouche à feu.

Les pièces de campagne ont singulièrement varié de poids à mesure qu'on a voulu les rendre plus mobiles et plus maniables. Pour arriver à ce but, Gustave Adolphe et Frédéric II les ont fortement allégées. On trouve en comparant les divers systèmes d'artillerie de campagne en usage, chez les différentes puisssances de l'Europe que les poids moyens de ces canons sont déterminés de la manière suivante :

Charges . . .	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{12}$ et $\frac{7}{16}$	$\frac{3}{8}$ et $\frac{1}{3}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{1}{4}$
Poids en boulets	200	184	157	140	110

En se servant de la même formule que pour les pièces de siége et en partant de 200, valeur correspondante à la charge $1/2$, on trouverait les résultats suivants :

Charges . . .	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{12}$ et $\frac{7}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{1}{4}$
Poids en boulets	»	182	162	150	138	120

On voit par là que l'expérience a établi pour le poids des bouches à feu, une moyenne à peu de chose près égale à la valeur calculée.

Les pièces de campagne des différentes puissances fatiguent donc à-peu-près également leurs affûts, à l'exception des pièces anglaises qui ne pèsent que 110 fois leur boulet au lieu de 120.

Pour les obusiers ils sont construits de manière à avoir les poids suivants :

Charges employées . .	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{18}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{14}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{12}$
Poids de la pièce en obus	25	31	34	37	39	42	44	47

Ces bouches à feu étant très-légères, comparativement aux canons de bataille, doivent plus fatiguer leurs affûts. Aussi est-on obligé d'employer des charges faibles dans les obusiers de gros calibres, à cause de leur violente réaction sur leurs affûts.

Voici enfin pour les mortiers en usage chez les différentes puissances, la série des poids de la bouche à feu correspondant aux charges employées :

Mortiers de côte	Charge	$\frac{3}{8}$	»	»	$\frac{1}{3}$	»	»	$\frac{2}{7}$	»
	Poids en bombes	140	»	»	125	»	»	109	»
Mortiers ordinaires	Charges	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{24}$
	Poids en bombes	94	75	64	56	52	45	38	35

Tourillons.

A l'époque du premier emploi de l'artillerie pour la guerre, les pièces mises en usage, comme les bombardes et les couleuvrines, furent construites sans tourillons; plus tard lorsque les bouches à feu s'améliorèrent, on y adapta des tourillons, qui devaient servir à les relier avec leurs affûts; depuis on a toujours continué à en donner aux pièces, à l'exception des mortiers coulés sur semelle. La position des tourillons relativement au centre de gravité et à l'axe de la pièce, a fait naître de nombreuses discussions, et comme elle est d'une haute importance, nous allons nous en occuper.

Généralement les tourillons sont placés en avant du centre de gravité et comme c'est autour de leur axe que peut s'effectuer le mouvement de rotation de la pièce, il en résulte une certaine prépondérance à la culasse, dont la valeur est exprimée par le poids qu'il faudrait suspendre à la bouche pour que la pièce fut en équilibre autour de l'axe des tourillons, si elle se trouvait librement suspendue suivant cet axe. Dans le service, la culasse vient donc naturellement s'appuyer sur la vis de pointage et par suite la position de la pièce se trouve parfaitement déterminée, puisqu'elle repose par trois points. Dans les mortiers et dans les obusiers de Gribeanval, les tourillons se trouvent en arrière du centre de gravité; dans ce cas la bouche à feu repose par ses tourillons et par le point d'appui du bourrelet sur le coin de mire.

Nous avons vu que les battements du projectile dans l'âme pouvaient forcer la pièce à saigner du nez, c'est à dire pouvaient soulever la culasse en pressant sur la partie inférieure de la volée; la prépondérance à la culasse pourrait suffire pour empêcher cet effet fâcheux qui donne naturellement de l'incertitude au tir. Mais d'un autre côté comme le pointage nécessite le soulèvement de la culasse et que deux hommes, embarrant avec des leviers sous le 1er renfort, doivent effectuer ce mouvement d'une masse qui va quelquefois jusqu'à 7000 liv., on voit de suite que la prépondérance de la culasse ne saurait dépasser une certaine limite sans être nuisible dans le service de la bouche à feu, et plus la pièce est légère plus la prépondérance de la culasse doit être considérable, sans toutefois entrainer les inconvéniens signalés.

Pour comparer l'effet de la prépondérance avec l'effet des chocs, dont elle est destinée à détruire en partie les conséquences, nous évaluerons la prépondérance en poids du projectile, comme nous l'avons fait pour l'effort exercé par le choc; on voit ainsi que pour les canons de campagne, où le poids du projectile ne dépasse pas 6^{kil}, on peut facilement donner à la culasse une prépondérance assez grande; quant aux pièces de siéges qui sont plus lourdes et qui ont un moment d'inertie beaucoup plus grand que les pièces de campagne à cause de leur longueur, la prépondérance à donner à la culasse est assez faible.

Voici un tableau des différentes prépondérances adoptées chez diverses puissances :

PIÈCES.	PRÉPONDÉRANCES A LA Culasse évaluée, en poids du projectile.
Canons de siége de Gribeauval,	8 à 9
Obusiers de 6^{po} — id. —	5 à 6
Obusiers de 24 de l'an XI,	1 à 1/2
Pièces de montagnes,	2 à 3
Canons de campagne de Gribeauval,	15
Canons Autrichiens,	7 à 8
Obusiers Autrichiens,	5 à 6
Canons de campagne Anglais,	8 à 12
Pièces de 24 en fonte, de côte et de marine,	10
Pièces de 16 en fonte, de côte et de marine,	12
Obusiers nouveaux de 6^{po} et de 24,	7 1/4
Obusiers nouveaux de siége,	6 3/4
Obusiers de montagne,	6 1/4
Ancien obusier de 8 pouces,	2 à 3
Obusier nouveau de côte,	7

L'inspection du tableau précédent fait faire quelques remarques importantes. Ainsi l'obusier de 24 de l'an XI, abandonné à cause du peu de justesse de son tir, saignait constamment du nez, et

cela devait arriver puisque la prépondérance de la culasse n'était que de 1 1/2 ; il en est et doit être de même du tir des pièces de montagne construites à différentes époques.

Pour les pièces de campagne de Gribeauval, on continue généralement à estimer à un 1/50 du poids total de la pièce, la prépondérance à la culasse comme cela était vrai pour les canons de Louis XIV ; mais ce rapport est évidemment erroné et la prépondérance réelle de la culasse est à peu-près la moitié de cette valeur qu'on lui assigne encore sans réflexion. En règle générale, lorsque les pièces sont très lourdes on doit donner à la culasse une prépondérance de 8 à 9 fois le poids du projectile; quand elles sont légères il faut porter la prépondérance à 12 ou 13 fois le même poids.

Comme les obus sont animés d'une vîtesse initiale assez faible, on pourrait ne donner aux obusiers qu'une prépondérance de 6 projectiles ; mais il y a de l'avantage et nul inconvénient à la porter à 7 ou 7 1/2. L'obusier de côte étant très-lourd et ayant une volée allongée, on a dû lui donner une prépondérance à la culasse plus considérable, ainsi il pèse 115 fois son projectile, qui lui même pèse 22 kil et on lui a donné une prépondérance de 7 obus.

Dans la construction de l'obusier de siége il a fallu donner à la culasse une prépondérance un peu moindre que dans les autres obusiers nouveaux afin d'obvier à la prompte destruction de son affût. En effet, dans cet obusier, la position de l'obus au moment du maximum de pression des gaz, se trouvant très-rapprochée des tourillons, on a diminué considérablement la fatigue de l'affût en les reportant un peu en arrière de cette position. On conçoit en effet que si le choc de l'obus quand il a lieu dans le logement, se trouvant agir en arrière des tourillons et tout l'effort de ce choc se trouvant réparti sur les points d'appui de la culasse et des tourillons, l'affût serait fortement pressé : au contraire, quand la pression a lieu un peu en avant des tourillons l'effort que l'affût doit supporter est incomparablement plus faible ; à la vérité, la pièce peut saigner du nez et la direction de l'obus s'abaisser; mais comme ceux-ci en ricochant peuvent encore atteindre le point à battre, on voit qu'on a évité un inconvénient grave, en se soumettant à un autre inconvénient beaucoup moindre. Puisqu'il y avait

nécessité de reporter les tourillons vers la culasse, ce changement a diminué d'autant la prépondérance qui s'est trouvée réduite à 6 3/4 environ. De la sorte on a pu se servir pour ces bouches à feu des affûts de 24, pour lesquels les effets de l'obusier de siége sont les plus grands qu'ils puissent supporter.

Nous allons actuellement rechercher l'influence de la position de l'axe des tourillons par rapport à l'axe de la pièce. Anciennement ces deux axes se trouvaient dans le même plan; on a ensuite abaissé celui des tourillons de 1/2 calibre pour toutes les pièces en usage; on a même construit des canons dans lesquels les tourillons étaient formés par un cylindre tangent à la surface de la pièce et se raccordant avec elle par un collet de métal et ils le sont encore dans les caronades actuelles.

Le tableau suivant contient les abaissements de l'axe des tourillons au-dessous de celui de la pièce dans les diverses bouches à feu :

DÉSIGNATION DES BOUCHES A FEU.	ABAISSEMENT DE L'AXE DES TOURILLONS *Au-dessous de l'axe de la bouche à feu.*
Nouveaux obusiers Anglais, ...	0
Obusiers de 24 de l'an XI, ...	2 lig.
Obusiers de Gribeauval de 8 po. et de 6 po.	6
Obusier nouveau de siége, ...	3/11 du calibre.
Obusier nouveau de montagne, ...	1/5 id.
Obusiers allongés de 24 et de 6 po.	1/10 id.
Canons de campagne, ...	1/12 id.
Obusiers Autrichiens, ...	1/16 id.
Pièces de siége et de côte de toutes les puissances, ...	1/2 id.

Voici l'opinion de Gribeauval sur la position des tourillons telle qu'il l'a donnée dans son premier mémoire au marquis de Vallières :

« On a placé l'axe des tourillons dans les pièces de batterie à 1/2
» calibre au-dessous de l'axe de l'âme pour pouvoir élever d'autant
» la genouillère et couvrir d'environ 3 po. de plus les affûts et les

» rouages, avantage considérable en batterie, mais inutile en ba-
» taille. Cette position contribue beaucoup à la destruction des
» affûts. Nous proposons de placer l'axe des tourillons de toutes
» les pièces de bataille à 2 ou 3 lignes seulement au-dessous de
» l'axe de ces pièces, pour les erreurs qui peuvent se rencontrer
» dans la construction de la pièce; car si, par mal-façon, l'axe des
» tourillons venait à se rencontrer quelque peu au-dessus de celui
» de la pièce, la culasse lèverait à chaque coup. »

Malgré cette opinion de Gribeauval, on pourrait sans inconvénient mettre pour les pièces de campagne l'axe des tourillons dans le plan de l'axe de l'âme. En effet, le poids de la pièce et le frottement des tourillons la retiennent dans la partie inférieure des encastrements, pendant que la pièce est en repos, et dans le tir ils empêchent l'arête de rotation de s'élever jusqu'à devenir horizontale, et cela malgré de petites *mal-façons*; la pièce ne pourrait donc pas être soulevée. Si l'on voit souvent la culasse d'une pièce faisant feu s'élever après le coup, cela tient à la réaction de l'élasticité. Car comme les affûts sont composés de matériaux élastiques, lorsque la culasse a pressé fortement sur la vis de pointage, la pression est transmise par celle-ci à l'affût et aux crosses qui réagissent à leur tour sur la culasse et la pressant en sens inverse peuvent la soulever; ce soulèvement a lieu d'autant plus facilement que la prépondérance de la culasse est moindre; aussi cela se présentait constamment dans l'obusier de 24 de l'an XI et se remarque dans le nouvel obusier du même calibre.

On a pensé que si l'axe des tourillons se trouvait au-dessus de celui de la pièce, l'effort opéré sur les tourillons serait diminué; des calculs ont même été présentés à l'appui de cette opinion, mais on y a reconnu des erreurs qui renversent complètement ces calculs. On a néanmoins cherché en 1820 à reconnaître les effets que produiraient sur leurs affûts des pièces construites d'après ce principe. Les pièces de montagne n'ayant pas d'anses, il a été possible de les retourner et l'on a eu ainsi des pièces offrant quant à l'axe des tourillons, la disposition proposée. On a vu à chaque coup la culasse se soulever fortement et la volée frapper violemment l'entretoise de volée. Il y avait donc un mouvement considérable de rotation imprimé à la pièce et comme ce mouvement n'était arrêté que par les surbandes, celles-ci se faussaient.

à tout coup. Enfin les crosses mêmes étaient soulevées et le recul se trouvait considérablement augmenté au lieu d'être diminué. Une faute de dessin commise dans les tables de Gribeauval, et rectifiée dans l'erratum, a donné lieu à cette fausse théorie, et a fait même soutenir que l'opinion de Gribeauval était, que l'axe des tourillons devait se trouver au-dessus de l'axe de la pièce. Nous avons reproduit un passage de l'un de ses mémoires qui répond très-explicitement à cette assertion.

Nous allons actuellement rechercher comment l'effort des pièces se répartit sur la vis du pointage et sur les tourillons. M. Poisson s'est occupé de cette question, mais en ne tenant pas compte du projectile dans la bouche à feu. Nous savons que l'on a, quand on suppose les charges très-petites et le vent nul,

$$m' v' + \frac{\mu}{2} v' = mv + \frac{\mu}{2} v.$$

Cette équation n'est qu'approximative et n'a lieu qu'en supposant que la section de l'âme est précisément égale à la surface d'action sur le boulet ; il n'en est plus de même si le vent existe ; dans ce cas, les gaz agissent suivant un grand cercle plus petit que la section de l'âme, et la quantité de mouvement développée n'est pas toute entière communiquée au boulet, celui-ci n'en reçoit qu'une quantité proportionnelle à sa surface. Les deux surfaces étant entre elles comme les carrés de leurs rayons, en admettant que le vent est très-petit et que la masse des gaz peut être considérée comme composée de tranches parallèles comportant chacune leur densité et en nommant c le rayon de l'âme et R celui du projectile, on a la nouvelle équation,

$$m' v' + \frac{\mu}{2} v' = \frac{c^2}{R^2} mv + \frac{\mu}{2} v,$$

qui représente le mouvement de la pièce, du projectile et de la charge tant que le projectile reste dans l'âme.

Dès que le projectile a franchi la tranche de la bouche, les gaz n'agissent plus sensiblement sur lui, mais presque toute la charge est encore dans la pièce et agit sur la culasse ; le mouvement du recul est donc fonction de la charge, mais le calcul qui peut amener à déterminer ce mouvement est extrêmement compliqué, à cause de la variation de densité des gaz d'une tranche à l'autre. Du

reste, comme c'est alors la charge qui se trouve lancée par la bouche à feu, l'équation que nous avons donnée doit être modifiée de manière à représenter la quantité de mouvement de cette charge. On trouve que 420^m est la vîtesse par laquelle doit être multipliée la masse de la charge et on a ainsi l'équation

$$m' v' + \frac{\mu}{2} v' = \frac{c_2}{R_2} m v + \frac{\mu}{2} v + 420^m . \mu,$$

équation de laquelle on tirera v' et par suite $m'v'$.

On a trouvé les rapports suivants entre les vîtesses que la pièce tend à prendre et la vîtesse du recul.

Rapport des charges à celui des projectiles		$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{7}{24}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{1}{2}$
Pour des poudres très-vives avec un faible vent . .	$\frac{m'v'}{mv} =$	1,29	1,35	1,48	1,52	1,56	»	1,77
Pour le tir à boulet, avec le vent ordinaire	$\frac{m'v'}{mv} =$	»	»	1,50	1,55	1,59	1,66	1,80
Avec la poudre ordinaire	$\frac{m'v'}{mv} =$	»	»	1,49	1,55	1,57 / 1,61	1,69	1,78

Maintenant voici comment on peut arriver à déterminer les valeurs des effets exercés par la pièce sur les tourillons et sur la vis de pointage. (fig. 36) Soit $x\,y$ la direction de l'axe de la pièce qui fait un angle θ avec le plan suivant lequel s'effectue le recul, soit P la pression sur la vis du pointage et θ' l'angle que celle-ci fait avec la verticale, soit m' la masse de la pièce v' la vitesse du recul parallèlement au sol, laquelle dépend comme on le verra plus loin de la masse M de l'affût du canon et l'intensité des frottements, soit enfin α la distance de l'axe des tourillons à l'axe de la pièce, β la distance dont l'axe des tourillons se trouve en avant du centre de gravité G, a la distance du centre de gravité au plan vertical qui passe par l'axe du tourillon, b la distance du centre de gravité au plan horizontal passant par le même axe du tourillon et l la distance de ce centre à la vis de pointage. Appelons T la pression horizontale de l'encastrement des tourillons contre ces tourillons et S la pression des surbandes contre ces mêmes tourillons qui seront par conséquent de sens contraire à la pression P et à la vitesse v que prend effectivement le système.

Nous considérerons d'abord les quantités de mouvement produites par les forces horizontales, puis celle des forces verticales, qui nous fournira deux équations, en égalant leur somme à

zéro, en vertu du principe de la conservation du mouvement du centre de gravité. Enfin en prenant et égalant à zéro la somme des forces qui tendent à imprimer au système des mouvements de rotation en sens inverse, nous aurons une troisième équation en P, S, T.

Pour les forces horizontales, nous avons d'abord en les supposant toutes appliquées en G. (fig. 37)

$$m' v' \cos\theta + P \sin\theta' - m v' - T = o. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Pour les forces verticales nous aurons de même

$$P \cos\theta' - m' v' \sin\theta - S = o. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Enfin pour les mouvements inverses de rotation imprimés autour du centre de gravité G nous avons

$$P\, l - m'v'\alpha + m'vb = o. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

On peut remplacer b par sa valeur en α β et θ; or nous avons,

$$b = BB' = DB' - DB = \alpha \cos\theta - \beta \sin\theta$$

substituant cette valeur de b dans la 3e équation, nous aurons

$$P\, l - m'v'\alpha + m' v \left\{ \alpha \cos\theta - \beta \sin\theta \right\} = o. \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

de ces trois équations, nous tirerons :

$$T = m' \left\{ v' \cos\theta - v \right\} + P \sin\theta'$$

$$S = P \cos\theta' - m' v' \sin\theta.$$

$$P = \frac{m' \left\{ \alpha v' - \alpha v \cos\theta + v \beta \sin\theta \right\}}{l}.$$

Dans le cas ordinaire ou θ et θ' sont très petits ou sensiblement nuls et où par conséquent $\cos\theta$ et $\cos\theta'$ sont égaux à l'unité et où $\sin\theta = \sin\theta' = o$, ces équations se réduisent à

$$T = m' (v' - v)$$

$$S = P.$$

et $$P = \frac{m' \alpha \left\{ v' - v \right\}}{l} \text{ et } P = T \frac{\alpha}{l}, \text{ et } \frac{P}{T} = \frac{\alpha}{l}.$$

Dans tous ces calculs, on néglige le poids de la pièce parce que la pression qui en résulte peut être considérée comme très-petite relativement aux pressions qui résultent des effets de la poudre.

On voit, d'après ces formules, que si α est positif P et S le sont aussi. Il y aura donc pression sur la vis de pointage et il en résultera une tendance à soulever les tourillons et les surbandes d'au-

tant plus grande que α sera plus grand et que l sera plus petit; quand α sera assez grand pour que le frottement soit vaincu ce mouvement aura lieu. Ainsi plus α sera grand plus l'affût sera tourmenté, par la pression de la culasse sur son point le plus faible, et par les tourillons qui tendront à fausser les surbandes: ces effets seront d'ailleurs d'autant plus grands que la longueur l et la masse m' de la pièce seront plus petites, parce que plus m' sera petit plus la vitesse v' sera grande et plus par conséquent la différence $v'—V$ le sera, supposant que la quantité M v reste la même.

Ainsi, l'abaissement de 1/2 calibre de l'âme des tourillons pour les pièces de siége n'a pas de grands inconvénients, tandis que c'est avec raison qu'on a considérablement diminué cet abaissement pour les pièces de campagne.

Du reste en se servant de ces formules et en tenant compte du frottement on trouve qu'avec un abaissement qui n'excède pas 1/8 du calibre au-dessous de l'axe de la pièce, il ne peut y avoir de rotation autour de l'axe des tourillons.

Pour les obusiers de siége, la fatigue supportée par le coin de mire est égale au 1/11 de l'effort total supporté par l'affût; pour les pièces de siége l'effort sur la vis de pointage est 1/26 de l'effort total et il en est de même pour l'obusier de montagne.

Dans les pièces longues l'abaissement des tourillons, en donnant à la culasse une tendance à s'abaisser la fait résister à l'effort des projectiles qui pourrait abaisser la volée et supplée ainsi à la prépondérance de la culasse qui, dans les pièces lourdes, ne peut pas dépasser certaines limites, pour laisser toujours facile l'opération du pointage. Ainsi, dans les pièces de siége, la position des tourillons à 1/2 et dans l'obusier de côte à 3/11 du calibre au-dessous de l'âme, est avantageuse en ce qu'elle augmente la fixité de direction de l'âme, sans trop fatiguer les affûts. Les tourillons des obusiers de campagne ont été mis à la limite pour la même raison, et leur axe est à 1/10 du calibre des obus ou 2/15 de diamètre des tourillons, au-dessous de l'âme de la pièce.

Connaissant l'effort que les tourillons ont à supporter, on peut à l'aide des formules relatives à la résistance des matériaux, calculer le diamètre qu'ils doivent avoir pour résister efficacement. Comme la résistance des cylindres à la rupture est en raison du

cube de leurs diamètres on voit que cette résistance serait en raison du calibre de toutes les bouches à feu, si celles-ci faisaient souffrir leurs affûts d'une manière proportionnelle. Quoique cela n'ait pas lieu, tous les canons ont pour diamètre de leurs tourillons le diamètre même de leur boulet; il en résulte que les tourillons des pièces de campagne seront plus fatigués que ceux des pièces de siége, et de même que les tourillons des obusiers auront encore plus à souffrir que ceux des canons de campagne.

Dans les pièces de fonte, les tourillons ont un diamètre supérieur de 4 lignes au diamètre de leur boulet, et cependant le calcul fait voir qu'ils sont plus faibles comparativement que les tourillons des pièces de bronze ; aussi il arrive fréquemment qu'ils se rompent, et cela a surtout lieu quand ces pièces sont montées sur des affûts de fer.

Dans les mortiers tirant à fortes charges, les tourillons se faussent quelquefois et cela arrive principalement quand les affûts sur lesquels les mortiers sont montés ont été longtemps abandonnés à l'influence de la pluie et de l'air. Les tourillons peuvent alors être mal ajustés dans leurs encastrements et avoir par conséquent à recevoir un choc dont l'effet n'est plus également réparti ; pour obvier à ce grave inconvénient , on a adapté aux tourillons des mortiers une masse de métal qu'on nomme le renfort et qui sert effectivement à les renforcer. Pour consolider encore les tourillons dont la base , comme nous l'avons déjà dit , peut présenter des fissures ou crevasses provenant de la coulée , on les raccorde avec la surface de la bouche à feu par un cylindre concentrique et de plus grand diamètre que l'on appelle embâse.

Dans les fonderies Anglaises , en coulant les pièces on a soin de donner aux embâses et aux tourillons de plus fortes dimensions qu'ils n'en doivent avoir réellement ; de la sorte , en les ramenant aux dimensions voulues , on peut enlever les soufflures et crevasses qui se manifestent vers le raccordement. Souvent aussi la poussière et les corps étrangers qui peuvent tomber dans les moules , lorsqu'ils sont dressés avant la coulée , viennent se déposer sur les arêtes inférieures du moule des tourillons et occasionnent des soufflures dans le métal. C'est une nouvelle raison pour laquelle en Angleterre , on modèle en tronc de cône la partie du moule qui doit contenir les tourillons. En France on se contente de nettoyer les moules avec grand soin.

Anciennement on terminait les embâses par unp lan parallèle au renfort. Gribeauval les a terminées par un plan tangent à la plate-bande de culasse, de sorte que leur tranche inclinée sur l'axe était bien parallèle aux faces intérieures des flasques dans la position primitive ; elle ne l'était plus dans le tir sous les différents angles de projection, mais elle n'en différait que très-peu; par suite il fallait laisser un peu plus de jeu à l'écartement des flasques dans cette partie et les pièces n'étaient pas parfaitement assujéties.

Dans les obusiers nouvellement construits, la tranche des embâses est perpendiculaire à l'axe des tourillons et les flasques des nouveaux affûts étant parallèles, il en résulte que les bouches à feu sont également maintenues, quelque soit l'angle de projection.

Dans les obusiers de campagne, l'écartement des embâses est égal au diamètre de la bouche à feu à la partie postérieure de l'embâse. Dans l'obusier de siége, elles sont tangentes à la surface extérieure du renfort comme dans le mortier à la Gomer. Les saillies sont très-faibles et l'on a dû les déterminer ainsi, pour pouvoir faire usage d'affûts communs avec les bouches à feu existantes. Dans l'obusier de montagne, où il n'y avait pas à remplir cette condition, on a pu donner plus de saillie aux embâses.

Dans les anciens mortiers, les tourillons étaient placés à la partie postérieure et s'appuyaient par le cul du mortier comme cela a encore lieu dans les pierriers et les mortiers Anglais. Ils sont un peu remontés dans les mortiers de Gribeauval à chambre cylindrique.

Enfin dans les mortiers à la Gomer, l'axe des tourillons répond à la partie inférieure de la bombe en place dans l'âme. Cette disposition en abaissant la bouche pour le nettoyage et pour le chargement et en diminuant le poids à soulever dans le pointage, facilite beaucoup le service des mortiers. Quant à l'écartement des embâses, il suffit pour permettre d'effectuer librement les mouvements du mortier entre les flasques.

Renflement du bourrelet.

Nous avons déjà vu plus haut que les battements pouvant avoir lieu à la bouche des pièces, et que le métal ne se trouvant soutenu vers ce point que par les parties en arrière, il y avait nécessité de renforcer le pourtour de la bouche, pour lui donner plus de résistance. Le renflement de métal déterminé par cette condition se

nomme le bourrelet pour les canons ; c'est une plate-bande de volée pour les obusiers. La raison qui a motivé le tracé du bourrelet est la détermination de l'angle de mire, c'est-à-dire de l'angle sous lequel la ligne de mire rencontre l'axe de la pièce. Si l'épaisseur du bourrelet se trouvait trop faible, on le surmonterait d'une lentille ou guidon par le sommet duquel passerait la ligne de mire. Si au contraire l'épaisseur y était trop forte on tracerait sur le bourrelet une entaille comme un cran de mire.

Il est important de déterminer la valeur la plus convenable de l'angle de mire, puisque c'est lui qui détermine le but en blanc, des pièces. Beaucoup d'auteurs, pour déterminer à priori le but en blanc, et par suite l'angle de mire à donner aux canons, ont établi qu'il fallait le placer à la distance la plus ordinaire à laquelle on fait feu sur l'ennemi et par conséquent de 450 à 600 mètres : mais cette détermination à priori n'a rien d'avantageux, comme nous le verrons plus loin.

Anciennement l'axe de la pièce et la ligne de mire se trouvaient parallèles, parce que l'on croyait que la trajectoire n'était autre chose que le prolongement de l'axe lui-même. Plus tard lorsqu'on s'aperçut que cette supposition était inadmissible, on a pensé que la première portion de la courbe décrite par le boulet était une ligne droite suivie d'un arc de cercle ou de parabole. Ces erreurs provenaient de ce que la trajectoire qui est réellement une courbe, n'a qu'une courbure très-faible dans sa branche ascendante. Les premiers fondeurs qui s'aperçurent de ce fait spéculèrent sur l'ignorance où l'on était des véritables principes du tir, et annoncèrent qu'ils possédaient un secret à l'aide duquel ils pouvaient allonger considérablement la portée des bouches à feu. Tout ce secret consistait simplement à incliner sur l'axe de la pièce la ligne de mire qui, pour être horizontale, nécessitait une élévation de la volée et donnait par suite une augmentation à la distance du but en blanc. Le prétendu secret fut bientôt connu de tout le monde, et l'on se servit alors de la ligne de mire, pour perfectionner le pointage.

Comme nous l'avons déjà dit, le but en blanc des canons a été généralement fixé de 450 à 600 mètres; mais cette position a des inconvéniens. En effet, si l'ennemi se trouve en deçà de cette distance, il devient fort difficile de pointer avec justesse, parce que l'appréciation de la quantité dont il faut pointer au-dessous du

point à battre est assez difficile sur le terrain, dont les ondulations peuvent aisément tromper l'œil.

Un des motifs qui a singulièrement mis en réputation l'Artillerie légère, au commencement de la révolution, est l'habitude que cette Artillerie avait d'aller se placer en batterie à une demi portée de canon de l'ennemi. Une fois placée là, elle avait peu de chose à craindre du feu d'un ennemi inexpérimenté. Aussi l'a-t-on vue, dans des affaires de plusieurs heures, n'éprouver aucune perte, tandis qu'elle en faisait éprouver de très-fortes.

L'angle de mire des canons de siége est de 1° 1/4; leur but en blanc est de 600 mètres environ, et la flèche de la trajectoire à 300 mètres de distance est d'environ 4 mètres; on voit par là que pour atteindre au but placé à 300 mètres, il faut, avec les pièces de siége, pointer à 4m au-dessous du pied du but. Ainsi pour battre des tranchées établies à 300m en avant d'une place, il faudrait pointer bien au-dessous de la ligne d'intersection des terres et du terrain naturel, parce que le relief du parapet des tranchées n'est que de 1m, 30 environ.

On reconnait qu'il n'est pas facile de déterminer exactement sur un terrain horizontal ou accidenté, le point où la ligne de mire coupe ce terrain, pour se diriger sur le point qu'il faut réellement viser. Cela est tellement vrai qu'en 1817, dans les Ecoles à boulets rouges, un but de 2 mètres de côté, en bois, placé vers 450 mètres, n'a pu être atteint que d'un seul boulet et à la seconde séance.

Dans les pièces de campagne l'angle de mire est d'un degré environ, et le but placé à 300m se trouve de près de huit pieds au-dessous de la trajectoire. On voit que si l'on cherchait à battre des masses de cavalerie à cette distance on tirerait beaucoup trop haut en pointant aux pieds des chevaux et l'on prodiguerait inutilement ses munitions. Aussi, ce qu'un officier d'artillerie doit faire avec soin c'est de bien examiner le point de chute de ses boulets et de corriger le pointage de manière à rendre son tir efficace. On peut conclure de ce que nous venons de dire que pour la pratique de la guerre, le but en blanc des pièces de bataille est trop éloigné. Du reste chez les nations étrangères il l'est encore plus qu'en France.

Dans les obusiers nouveaux, bien que l'on ait conservé le même

angle de mire, le but en blanc est plus rapproché, parce que la trajectoire que l'obus doit décrire est moindre que celle des boulets. Le point le plus haut de la trajectoire de l'obus a été déterminé par la hauteur des objets les plus grands que l'on peut se proposer de battre. Aussi l'angle de mire des obusiers de campagne ne doit, dans aucun cas, excéder un degré. Si un obusier était destiné à tirer constamment avec de fortes charges, il ne faudrait donner que 3/4 de degré à l'angle de mire.

Quant aux pièces et aux obusiers de côte qui doivent battre des objets qui s'élèvent de 15 à 20 pieds au-dessus de la surface de l'eau et qui ne peuvent guère s'approcher à moins de 300^m, il n'était plus nécessaire de limiter ainsi l'angle de mire et l'on a pu le faire varier de 1° 1/4 à 1° 1/2; pour l'obusier de côte on a adopté 1° 1/2.

Conditions particulières aux diverses espèces de bouches à feu.

Après avoir déterminé les conditions générales auxquelles la construction des diverses parties des bouches à feu doit être subordonnée, il convient d'en passer en revue les différentes espèces pour étudier séparément la manière dont chacune d'elles satisfait, non seulement à ces conditions générales, mais encore aux conditions particulières relatives au service spécial auquel elle est destinée. Nous allons nous occuper de cet examen.

Canons de siége.

Ces canons étant destinés à ruiner et à renverser les murailles et les remparts doivent communiquer aux projectiles de grandes vitesses, pour produire de grands effets, et les lancer sous de petits angles à l'horizon, afin d'augmenter les chances de frapper le but. Les canons de siége doivent donc : 1° être tirés avec les charges susceptibles de produire les plus grands effets; 2° avoir la longueur nécessaire pour utiliser ces charges; 3° avoir un poids très-considérable relativement au projectile, pour que le recul produit par ces fortes charges et sous de petits angles de projection ne soit pas démesuré. Les vitesses initiales qui sont au-dessus de 500^m

par seconde étant assez promptement ramenées à celle-ci par la résistance de l'air, il s'ensuit qu'on ne peut les employer utilement qu'à de très-petites distances, comme dans le tir en brèche par exemple, où les batteries sont ordinairement établies sur la crête du chemin couvert et souvent sur la contrescarpe de l'ouvrage à battre. Dans cette position la charge de moitié du poids du boulet offre réellement de l'avantage, parce que la résistance de l'air n'a pas le temps de diminuer d'une manière notable la vitesse du projectile; il n'en serait pas ainsi à une distance un peu grande de 300^m, par exemple, pour laquelle les charges de 1/2 ou de 1/3 produiraient des effets peu différents. Les plus fortes charges ne sont donc bonnes à employer que lorsque l'objet à battre est extrêmement rapproché. D'un autre côté les enfoncements des projectiles étant proportionnels à leur diamètre, il en résulte que pour battre en brèche il y a un avantage réel à employer les pièces du plus grand calibre; aussi se sert-on de préférence des canons de 24 et de 16. A la rigueur on pourrait employer des canons de 12 pour entamer de la maçonnerie, si on était très-rapproché; mais dès qu'une batterie de brèche est établie au-delà de la contrescarpe ou du chemin couvert, il ne faut y admettre que du 24 ou du 16. A de grandes distances le 24 seul peut être avantageusement employé. Quant au 8 il est insignifiant dans tous les cas où il s'agit de renverser des murailles.

En général les calibres de 12 et de 8 sont plus applicables à la défense qu'à l'attaque, et reçoivent plus spécialement pour cette raison le nom de canons de place, et ceux de 24 et de 16 le nom de canons de siége.

Comme le 24 et le 16 peuvent et doivent souvent être tirés à la charge du 1/2, il faut que ces canons aient un poids très-considérable; mais d'après ce que nous avons vu, les canons de 12 et de 8 n'étant pas destinés à tirer avec des charges supérieures au 1/3, il ne serait pas nécessaire de leur donner un poids aussi considérable qu'aux canons de 24 et de 16. Aussi pourrait-on ne leur donner que 175 à 180 fois le poids de leur projectile au lieu de celui de 265 et 275 fois qu'ils ont réellement. Du reste, on a été forcé de leur donner un poids assez fort, parce que ces canons étant destinés à tirer à embrâsures, devaient avoir une longueur de volée suffisante pour pouvoir s'engager dans l'embrâsure de manière à la

ménager. Sous Louis XIV cette longueur fut fixée à 10 pieds pour tous les calibres. En l'an XI on a construit des pièces de 12 qui avaient 22 calibres de longueur et qui pesaient 170 fois leur boulet; mais ces pièces n'ont pu être admises parce qu'elles étaient trop courtes et trop légères. Aussi a-t-on conservé les poids et les longueurs des pièces de Gribeauval, comme lui-même avait adopté la longueur de la pièce de 24 de Vallières. Il pensait cependant qu'on pouvait avec avantage la raccourir d'un calibre; mais en conservant les dimensions de ces bouches à feu, Gribeauval avait adopté une marche sage, qu'on a suivie dans la création du nouveau matériel; car de cette manière les affûts actuels peuvent recevoir non-seulement les bouches à feu de Gribeauval et celles de Vallières, mais encore celles qui ont été fondues sous Louis XIV. Il est évident qu'un État ne peut changer complètement tout un matériel existant sans se grever de dépenses énormes; ces dépenses se trouvent à-peu-près annulées quand les améliorations introduites permettent de continuer jusqu'à son entière consommation l'usage du matériel préexistant, et il y a eu, en adoptant ce parti, une économie considérable, en outre de la simplification qu'une semblable disposition laisse subsister dans l'armement des places. Ces considérations font voir que les canons de siége et de place sont construits de manière à présenter de très-grands avantages et l'on ne peut blâmer que l'inclinaison de la ligne de mire qui est de 1° 1/2 et qui éloignant le but en blanc de la pièce en faisant passer la trajectoire trop au-dessus de la ligne de mire, rend le pointage très-difficile, quand il s'agit de battre un point situé en-deçà de ce but en blanc.

Canons de bataille.

Anciennement les canons dont on se servait dans les batailles n'étaient pas d'un système différent de ceux qu'on employait dans l'attaque et dans la défense des places. C'étaient les pièces du plus petit calibre que l'on trainait à la suite des armées et que l'on établissait à l'avance dans des positions qu'elles devaient conserver. Les armées n'avançaient alors qu'avec une extrême lenteur et leur artillerie se trouvait encore le plus souvent de quelques jours en retard.

Gustave-Adolphe le premier, et ensuite le Grand Frédéric, songèrent à alléger l'artillerie de bataille et s'attachèrent à obtenir des batteries de canons légères et mobiles. C'est pendant la guerre de sept ans qu'eurent lieu les premières améliorations notables du système d'artillerie de campagne, améliorations auxquelles on travailla avec une égale ardeur de part et d'autres. Gribeauval, en revenant en France après avoir commandé l'artillerie Autrichienne, rapporta les perfectionnements qui avaient été introduits dans l'artillerie de bataille, et comme il avait acquis une très-grande habileté par sa longue expérience, il amena les canons de campagne Français au point de perfection où ils sont demeurés jusqu'à ce jour et qui n'a pu s'obtenir que par de longs tâtonnements.

Les pièces de campagne ne devant pas tirer à embrâsures peuvent être beaucoup plus courtes que les pièces de siége et de place; c'est ce qui a lieu effectivement. Mais on peut aussi reprocher aux canons de bataille, d'avoir un angle de mire trop considérable. En résumé le poids, la longueur et la résistance de ces pièces sont aussi bien réglés qu'on pourrait le faire maintenant après 70 années d'expériences; de plus leur stabilité dans le tir est assez assurée par une prépondérance à la culasse de 6 fois le poids du boulet, et par un abaissement de 1/12 de calibre de l'axe des tourillons au-dessous de l'axe de la pièce.

Canons de côte.

Les canons de côte diffèrent très-peu de ceux de la marine, pour laquelle on a depuis peu renoncé au calibre de 36, à cause du poids considérable de la charge. Le matelot, premier servant de gauche, se trouvait obligé d'introduire la charge dans la pièce en se penchant en dehors du navire, cette charge pouvait facilement lui échapper des mains et tomber à la mer. On n'embarque plus que des canons de 30; mais les pièces de côte sont toujours des calibres de 36, de 24, de 16 et de 12. Les canons de côte ne devant tirer que sur des objets situés à des distances d'au moins 300^m, ne doivent recevoir que des charges du 1/3 du poids du boulet. Ces canons sont en fonte, parce que l'armement du littoral de la France ne pourrait être complété avec des pièces de bronze sans une dépense tellement considérable, qu'on ne peut

songer à s'y soumettre. Ces pièces ne peuvent d'ailleurs tirer à l'embrâsure, parce que les objets à battre étant extrêmement mobiles il faut à la pièce un champ de tir très étendu, et, par conséquent, elles n'ont pas besoin d'avoir une grande longueur. Leurs dimensions sont moindres que celles des canons de bronze, à l'exception des épaisseurs qui doivent être plus considérables à cause de la moindre ténacité de la fonte.

Les canons de côte quoique tirant au 1/3 sont cependant plus lourds, comparativement aux pièces de bataille et pèsent environ 200 fois leurs projectiles. La prépondérance à la culasse est assez forte et l'axe des tourillons étant à 1/2 calibre au-dessous de l'axe de la pièce, les canons de côte ont une grande stabilité dans le tir. Le défaut de ces pièces est de n'avoir pas des épaisseurs suffisantes pour mettre les canonniers à l'abri des accidens que la qualité de la fonte peut entraîner. Nous avons vu en effet qu'à la longue il s'y manifeste des fissures qui finissent par occasionner la rupture de la pièce. Du reste, en augmentant les épaisseurs comme nous l'avons déjà dit on ne pourrait que retarder la rupture sans l'empêcher en aucune façon. Aussi avec les canons de côte ne doit-on jamais dépasser la charge du 1/3, et les seules variations qu'on puisse se permettre de faire subir à la charge sont des diminutions. Quand on essaye des fontes destinées à l'artillerie de marine, on coule une pièce de 8 que l'on charge comme nous l'avons vu plus haut de 13 boulets placés en avant d'une charge d'un mètre de longueur; cette expérience ne peut se renouveler plus de 50 à 55 fois, sans entraîner la rupture de la pièce. La rupture peut causer des accidents très-graves; ainsi à bord du vaisseau de l'État *la Provence*, pendant l'expédition d'Alger, un canon en éclatant a mis 40 hommes hors de combat.

On voit par là qu'il faut absolument s'abstenir, dans le tir des pièces de côte, d'augmenter la charge adoptée. C'est à cause de la fragilité de la fonte qu'on ne donne pas d'anses aux canons de côte. Les tourillons ont un diamètre de 3 à 4 lignes plus fort que le diamètre du calibre, et le bouton de culasse est aussi de dimensions plus considérables que le projectile. Les objets à battre étant généralement éloignés, on a pu augmenter sans inconvénients l'angle de mire, qui, pour les canons de côte, est de 1° 1/2.

Obusiers.

On a tenté à plusieurs époques de lancer des projectiles creux à l'aide de bouches à feu allongées. Les premiers essais n'ayant pas été couronnés d'un grand succès, on y a renoncé à différentes reprises pour revenir enfin au système des obusiers qui n'ont plus été abandonnés. Comme on supposait que la fusée placée à la partie antérieure du projectile ne pouvait s'enflammer dans le tir, on pensa d'abord à la disposer à la partie postérieure et dans l'axe même de la pièce; mais il arrivait presque toujours que la fusée était enfoncée et que l'obus éclatait sur le champ; il fallut renoncer à ce mode de chargement et l'on imagina alors de percer dans la pièce deux canaux de lumière dont l'un aboutissait à la charge et l'autre à la fusée qui était ramenée vers la paroi supérieure de l'âme. Dans d'autres bouches à feu on continua bien à placer la fusée dans l'axe, mais on la garantit du choc immédiat des gaz en adaptant un sabot au projectile et en pratiquant dans ce sabot divers canaux convergents vers la fusée. Ces deux systèmes n'ont pas été adoptés. Nous avons déjà dit que les bouches à feu destinées à lancer des projectiles creux furent d'abord très-longues; mais comme d'un côté on perfectionna le tir des bombes dans les mortiers, on tenta d'étendre l'emploi des mortiers et des bombes des feux courbes aux feux droits. On essaya de tirer à ricochet avec des bombes lancées sous de petits angles; pour celà on monta des mortiers de petits calibres sur des affûts à rouage; bientôt on reconnut la nécessité de couler des pièces de calibres intermédiaires entre les mortiers et les canons et qui fussent spécialement destinées à lancer des projectiles creux dans le tir direct. Ces bouches à feu devaient être plus longues et plus lourdes que les mortiers, afin d'utiliser toute la charge et de soulager les affûts, et d'un autre côté elles devaient être plus courtes que les canons pour pouvoir se charger à la main. Ces considérations conduisirent Vallières à adopter un obusier de siége qui avait trois calibres de longueur d'âme et qui lançait de gros obus avec de petites vîtesses sous de très-grands angles; ces obusiers s'employèrent aussi en campagne. Depuis on chercha à obtenir une vîtesse plus grande et à tirer sous des angles beaucoup moindres; Gribeauval introduisit à cet effet l'usage de l'obusier de 6 pouces qui se chargeait aussi à la main. Les obusiers

Russes allongés qui imprimaient à leurs projectiles de très-grandes vîtesses donnèrent l'idée de modifier dans le même sens les obusiers Français. Déjà en l'an XI on avait construit un nouvel obusier auquel il avait fallu renoncer. En 1815, en conservant les canons de bataille de Gribeauval, on décida que les obusiers seraient changés et c'est par suite de cette décision et après de nombreuses expériences qu'on est arrivé au système d'obusiers adoptés aujourd'hui.

On essaya d'abord des obusiers allongés comme les obusiers Russes, mais d'un calibre supérieur. On en construisit des calibres de 6^{po} et de 24, pour lesquels les charges employées étaient de 5^{liv} et de 4 ^{liv}. Les effets obtenus étaient très-grands; mais aussi les affûts avaient beaucoup à souffrir et ne résistaient pas longtemps. D'un autre côté la vîtesse initiale de l'obus était telle qu'un projectile traversait les lignes ennemies et n'y produisait que l'effet d'un boulet plein, en allant éclater bien au-delà. On réduisit les charges jusqu'à n'être qu'un kilogramme pour le 24 et 1^{kil} 5 pour le 6^{po}. Ces deux charges étaient encore trop fortes pour le tir rasant et pour satisfaire à la condition essentielle que l'obus s'arrête entre les deux lignes de l'ennemi qu'on doit supposer, la première à 600^{m} et la deuxième à 1000^{m}, et afin que ses éclats ne soient pas perdus, la durée de la fusée a été fixée de telle sorte qu'avec les grandes charges et par suite avec les grandes vîtesses l'obus éclate à la deuxième ligne et qu'avec les petites charges il éclate avant; de cette manière l'effet est toujours compris entre les lignes; pour obtenir ce résultat important on adopta une seconde charge moitié de la première. On aurait pu employer comme en Angleterre des fusées plus courtes qui fissent éclater le projectile vers le point voulu; mais on a reconnu à ce système de trop graves inconvéniens pour pouvoir l'adopter. Avec les charges plus petites qui ne portaient l'obus qu'à la deuxième ligne, des fragmens du sabot restaient presque toujours dans l'âme et gênaient la manœuvre. Ces difficultés étaient telles qu'on est resté en suspend jusqu'en 1827, sans adopter définitivement les nouveaux obusiers. Outre l'inconvénient que nous venons de mentionner, les sabots employés alors en faisaient naître un second tout aussi grave. Ce sabot composé d'une partie cylindrique

suivie d'une partie conique, était par fois arrêté par les crasses qui provenaient du tir. L'obus tournait alors et arcboutait contre la paroi supérieure de l'âme de manière à ne pouvoir plus avancer, quelque force qu'on employât pour le forcer à gagner le fond de l'âme. On est parvenu à remédier à ces deux inconvénients en supprimant la partie cylindrique du sabot et en proportionnant le diamètre de la chambre de telle sorte que l'explosion de la charge put chasser tous les fragments du sabot.

Les chambres adoptées ont été du calibre de 12 pour l'obusier de 6po et du calibre de 8 pour l'obusier de 24. Le raccordement conique de la chambre a lui-même été modifié. Lorsque l'inclinaison de l'arête de ce cône était grande, la charge en montant sur le plan incliné inférieur pouvait remonter la paroi supérieure de la partie conique et s'arrêter ainsi sans qu'on put l'introduire dans la chambre. En adoptant de nouvelles dimensions pour le raccordement, tous les inconvéniens ont été évités.

Obusiers de Siége.

L'obusier de siége, qui est également destiné à servir à la défense et à l'attaque des places, devait être tiré sans sabot pour éviter le danger des éclats de ceux-ci ; il devait par conséquent se charger à la main. Devant être court, il fallait augmenter sa charge pour obtenir un effet satisfaisant ; et comme par suite la réaction du projectile qui pèse de 21 à 22kil. devait être considérable, le poids de l'obusier devait être augmenté assez pour qu'il eût une stabilité convenable. Dans la construction de cet obusier on se proposa de déterminer les dimensions de manière à ce qu'il pût être monté sur l'affût de siége de 24 et lancer son projectile jusqu'à 1800m, distance à laquelle s'établissent d'ordinaire les dépôts de tranchée qu'il est important d'inquiéter. On essaya d'abord un obusier de 900 kil. que l'on tirait à la charge de 2kil. Il fatigua tellement son affût qu'il fallut donner au métal une grande surépaisseur, non seulement autour de l'âme, mais encore à la culasse qui comporte une partie massive de très grande dimension. On est ainsi arrivé au poids de 12000kil. mais il aurait fallu porter ce poids à 15000kil. si on eût voulu que cet obusier ne fatiguât pas son affût plus que le canon de 24. Les tourillons ont été portés un peu en avant pour la conservation de l'affût. On aurait pu adopter un

obusier d'un plus grand effet pour l'attaque des places; mais comme avant tout on désirait une bouche à feu qui put satisfaire à l'attaque comme à la defense, on s'est borné à adopter l'obusier de siége de 8_p^o.; l'axe de ses tourillons est de 3/11 du calibre au-dessous de l'axe de l'âme et la prépondérance à la culasse est de 6 fois et 3/4 le poids de l'obus. Avec cet obusier, la trajectoire ne devant pas s'élever beaucoup, on a donné à la ligne de mire une inclinaison de 1 degré qui donne un but en blanc de 400^m. Avec cet obusier on a obtenu à la charge de 2^{kil}. une portée de près de 1900^m. (sous l'angle de 12° 1/2 1957^m.)

Obusiers de montagne.

Deux des frontières de la France sont occupées par des chaînes de montagne, les Alpes et les Pyrénées, dans lesquelles l'artillerie ordinaire ne peut être employée. Il a donc fallu adopter pour la défense de ces frontières des bouches à feu particulières, susceptibles de se transporter facilement dans les endroits d'un abord inaccessible pour les pièces ordinaires.

De tout temps et chez les différentes nations on a reconnu la nécessité d'avoir un système d'artillerie spécialement destinée à cet usage. Ainsi, on prit aux piémontais, dans les premières guerres de la révolution, des canons de montagne du calibre de 3, d'une longueur d'âme de 15 calibres 1/2 et qui ne pesaient que 180 liv. En Espagne, on avait à la même époque des pièces de 2, de 3 et de 4 dont les proportions étaient ainsi déterminées.

Le 2 de 15 calibres de longueur pesait		150 liv.
Le 3 de 8 et 9 calibres	id.	112 liv.
Le 4 de 8 calibres	id.	150 liv.

En 1823 au moment d'entrer en Espagne, on adopta deux espèces de pièces de montagne qui avaient le même poids et le même affût. C'était un obusier de 12 et un canon de 4. En 1827 le canon de 4 fût supprimé et l'obusier qui pesait 85 kil fut modifié.

L'obusier de montagne adopté aujourd'hui pèse 100 k. et peut être facilement porté par un mulet. Sa prépondérance à la culasse est de 6 1/4 fois le poids de son obus; l'axe des tourillons est de 1/5 du calibre au-dessous de celui de la pièce; sa charge est de 275 grammes et l'angle de mire est de 1/2 degré seulement.

Nous terminerons ce qui est relatif aux canons de bataille et aux obusiers par le tableau des moyennes obtenues pour le but en blanc de ces différentes pièces dans les épreuves récentes faites à Vincennes, à La Fère et à Metz.

CALIBRES.	DISTANCES DU BUT EN BLANC.
Canons de 12.	543m.
Canons de 8.	500
Obusiers de 6po à grande charge.	422
Obusiers de 6po à petite charge.	300
Obusiers de 24 à grande charge.	370
Obusiers de 24 à petite charge.	260

On a fait aux obusiers du nouveau modèle quelques reproches qu'il est important de combattre, et dont il est facile d'apprécier le peu de valeur. D'abord on a trouvé blâmable que ces bouches à feu ne présentassent pas autour de la chambre une plus grande épaisseur de métal qu'au premier renfort. On ajoutait qu'il aurait mieux valu continuer le renfort jusqu'à la plate-bande de culasse. Mais comme le maximum de tension des gaz n'a lieu qu'après le déplacement de l'obus il en résulte que dans les premiers instants de ce déplacement l'origine du premier renfort supporte à très-peu près la même tension que le pourtour de la chambre, et comme de plus les épaisseurs doivent être proportionnelles aux diamètres, pour résister aux mêmes tensions, et que l'épaisseur au pourtour de la chambre est supérieure à celle qui est nécessaire au renfort, le premier reproche n'est fondé en aucune façon et l'on eût pu blâmer avec plus de raison l'excès de métal qui se trouve à l'origine du renfort. D'ailleurs ce n'est jamais par le pourtour de la chambre que les obusiers périssent. Les épaisseurs devant être en raison directe des diamètres intérieurs, il s'en suit qu'à épaisseurs égales, le pourtour de la chambre est beaucoup plus résistant que le renfort.

On a ensuite reproché aux obusiers nouveaux d'avoir la culasse allégée par l'évidement du pourtour de la chambre. On en concluait que les tourillons se trouvaient par suite trop portés en avant, et empêchaient ainsi la volée d'entrer suffisamment dans les embrasures. Ce reproche n'est pas plus juste que le premier: car le métal enlevé au pourtour de la chambre, sert précisément à allon-

ger la volée, et l'on reconnait par le calcul que l'axe des tourillons se trouverait plus rapproché de la bouche, si le métal placé à la volée était réparti autour de la chambre. On a dit aussi que la plate-bande de la volée augmentait en pure perte le métal employé. Mais d'après ce que nous avons déjà dit, il faut toujours un renflement à la bouche, pour soutenir contre les battements le métal qui ne se trouve appuyé que sur ses parties en arrière. L'expérience d'ailleurs a prouvé que les obusiers poussés à bout périssaient par la volée. On a tiré ces obusiers avec des projectiles ovoïdes, et quand le grand axe de ces projectiles s'est présenté obliquement par rapport à l'axe de l'obusier, la volée s'est ouverte. Enfin on a pensé qu'il aurait mieux valu s'abstenir de donner 1/10 de calibre de distance aux deux axes des tourillons et de la pièce; mais cet éloignement a dû être donné, pour obtenir stabilité dans le tir, sans que la culasse fut rendue plus pesante.

On a trouvé aussi que les épaisseurs de métal des obusiers de montagne étaient trop faibles. Ce reproche n'est pas mieux fondé que ceux que nous venons d'examiner. En effet dans les expériences faites à Vincennes en 1827 et 1828 des obusiers d'épaisseurs moindres que celles de l'obusier adopté ont parfaitement résisté, même avec des projectiles pleins et des boites à balles.

Il est à remarquer que la légéreté était ici une qualité indispensable à cette bouche à feu qui doit pouvoir être transportée à dos de mulet.

Obusiers de côte.

L'emploi des projectiles creux contre les vaisseaux a été regardé de tout temps comme très avantageux. Vauban, chargé de mettre Brest en état de défense, fit disposer 90 mortiers et 8 canons de 64 à cet effet. M. de Morogues proposa en 1765 d'employer contre les barbaresques les boulets creux dans les canons.

Gribeauval proposa en 1770 de lancer des obus incendiaires dans le bordage des vaisseaux, et en 1778 d'employer les obus ordinaires pour la défense des côtes. En 1798, on lança à Meudon des obus de 6 Po avec des pièces de 36 contre un bordage de vaisseau, et des obus de 24 avec le canon de ce calibre. Les effets furent très-grands. En 1747 on a fait également avec succès les mêmes expériences à Cherbourg et en 1797 à Toulon et à Lorient ; en

1811 sur l'Escaut ; en 1812 à Anvers ; en 1813 à Dantzick, et partout on reconnut qu'un seul obus peut faire couler un vaisseau. En 1796, 1798 et 1799 le comité proposa au ministre, le tir des obus dans le canon pour les combats de mer et pour la défense des côtes. Napoléon ordonna de tirer les obus de 6 po avec les pièces de côte de 36 et d'approvisionner chacune de ces pièces de 30 et même de 100 obus. Enfin il fit couler en bronze des pièces de 48 destinées à la défense d'Anvers, pour tirer des boulets creux, et un canon-obusier de 8 po du poids 8500 liv, destiné à lancer des obus à forte charge et qui se voit encore à Douai. Malgré toutes ces propositions et le succès des expériences, ce n'est que depuis très-peu de temps qu'on a adopté les obusiers pour la défense des côtes. C'est en 1822 que M. le colonel Paixhans proposa des obusiers de 8 po et même de 10 po pour la marine; il obtint qu'on fit des épreuves. En conséquence des obusiers de ces modèles furent embarqués. Mais il y a de graves objections à faire contre l'emploi des projectiles creux à bord des vaisseaux de l'état. Dans un combat les poudres circulent incessamment dans les batteries et les accidents sont très-fréquents. S'ils sont peu dangereux avec les poudres seules, il n'en est pas de même si des obus s'enflamment et éclatent ; de pareils accidents seraient on ne peut plus désastreux. On rapporte qu'à la bataille navale de Lépante (1571) il y avait eu plus d'hommes mis hors de combat par les éclats des projectiles qui avaient pris feu par accident, que par les projectiles de l'ennemi.

L'obusier ou canon à bombe du colonel Paixhans pèse 3830 kil. Il a une longueur d'âme de 10 calibres 1/2, la chambre comprise ; ses épaisseurs sont très grandes. Elles sont de 9po 3lig à la chambre, de 7po 9lig au renfort, de 6po 11 lignes à l'origine de la volée, et de 4po 5lig à la bouche. L'obus est assujéti dans un sabot formé d'une partie cylindrique et d'une partie conique destinée à venir se loger dans la chambre. Nous avons vu les inconvéniens qui résultent de cette espèce de sabot; celui-ci a été remplacé par un sabot purement conique. L'axe des tourillons est de très-peu au-dessous de l'axe de la pièce, et comme la prépondérance à la culasse est fort petite, cette bouche à feu est très-sujette à saigner du nez.

En construisant l'obusier de côte on a cherché à obtenir une

bouche à feu beaucoup plus légère. Celui-ci ne pèse effectivement que 2500^{lil}. il est facilement manœuvrable, puisque son poids est moindre que celui de la pièce de 24. Les épaisseurs sont de 6^{po} à la chambre, 4^{po}. 6^{lig} au renfort, 4 pouces à l'origine de la voîce et 2^{po} 10^{lig} à la bouche; l'axe des tourillons est abaissé de 3/11 de calibre et comme il est reporté en avant du centre de gravité la pièce a une grande stabilité. Cet obusier se chargeant avec un sabot conique, on peut le tirer à très-petites charges. Il est important de pouvoir s'en servir ainsi, car avec de fortes charges un navire situé à petite portée, serait traversé par l'obus; tandis qu'il vaut beaucoup mieux que celui-ci éclate dans la muraille. L'obusier de côte pourrait s'employer dans l'attaque et la défense des places, pour atteindre les points éloignés.

Quoiqu'on ait adopté pour l'obusier de côté des épaisseurs bien inférieures à celles du canon à bombes, sa résistance est suffisante puisque les épaisseurs ont proportionnellement 1/3 en sus de celles des canons de fonte; sa charge à chambre pleine est de 1/6 du poids de l'obus et le maximum de tension des gaz dans cette bouche à feu est au-dessous de celle des canons; il a été tiré à la charge de 1/4 et aussi de 1/3 du poids de l'obus.

On peut faire à l'obusier de côte les mêmes reproches qu'aux obusiers de campagne, et y répondre de la même manière. Quant à l'épaisseur à la bouche, elle est peut-être de 1/2 en sus de ce qu'elle devrait être, parce que dans les pièces de fonte il ne se forme pas de logements ni de battements qui aient plus de 2 à 3 points. Ces obusiers ont été éprouvés avec une charge de 10$^{liv.}$ et des obus pleins du poids de 80 livres. Ils ont bien résisté.

Mortiers.

Les mortiers sont les premières bouches à feu qui aient été employées. Ils servaient à lancer des boulets de pierre. Les bombes ne furent mises en usage que plus tard et quand les mortiers étaient à peu près abandonnés, à cause des avantages qu'on avait trouvés dans l'emploi des pièces longues. Les premiers projectiles creux lancés à l'aide des mortiers furent des boulets incendiaires, et ce ne fut que plus tard qu'on imagina de faire éclater les projectiles des mortiers, pour faire le plus de mal possible à l'ennemi. La manœuvre primitive des mortiers à bombes était compliquée et dangereuse. On était obligé de dresser le mortier, et avant de

donner le feu à la charge, on allumait la fusée de la bombe, ce qui pouvait entraîner des accidents. Une couche de terre interposée entre la charge et la bombe empêchait celle-ci d'être brisée par le choc des gaz et par suite la fusée ne pouvait s'enflammer dans l'explosion. On crut pouvoir remédier à cet inconvenient en rendant plus vive la composition des fusées et en supprimant la couche de terre qui se plaçait sur la charge ; mais alors il fallut donner aux bombes un culot qui leur permît de résister à l'action des gaz. Ce moyen réussit pour les petits calibres, mais non pour les mortiers de 12p° dont le tiers et souvent la moitié des bombes se brisaient en partant ; c'est ce qui fit que Gribeauval renonça au calibre de 12po. Lorsqu'après lui on a pensé à se servir de mortiers à chambres tronconiques, la portion de la surface de la bombe soumise au choc des gaz se trouvant beaucoup plus considérable, l'effort de ces gaz s'est trouvé réparti sur une plus grande étendue et la bouche a pu résister parfaitement. Dans les mortiers de Gribeauval la partie cylindrique de l'âme se raccordait avec la chambre par une partie conique suivie d'une partie sphérique, rachetée elle-même par la chambre proprement dite qui était cylindrique; il résultait de cette disposition que lorsque la bombe était en place elle appuyait sur la paroi inférieure, et que les gaz, en s'échappant par la partie supérieure lorsqu'ils avaient une très-grande température, altéraient assez promptement les arêtes saillantes du raccordement ; de plus l'impulsion communiquée à la bombe ne pouvant être appliquée à son centre, à cause de sa position dans le mortier, il en résultait inévitablement des battements très-forts. Ces inconvénients n'existent pas dans les mortiers à chambre tronconique. Pour les éviter autant que possible dans la manœuvre des mortiers de Gribeauval, il fallait dresser le mortier, la bouche en l'air et garnir la bombe d'éclisses solidement fixées. Malgré ces précautions en remettant le mortier en batterie, la bombe se rapprochait toujours de la paroi inférieure.

Les tourillons furent d'abord placés au niveau du cul du mortier, parce que leurs affûts étaient en bois et qu'il était nécessaire de faire porter les tourillons des bouches à feu sur une plus grande étendue afin d'empêcher l'encastrement de l'affût d'être trop fortement comprimé. On conçoit qu'alors l'exécution du tir de ces bouches à feu offrait de très-grandes difficultés. Lorsqu'on

a adopté les affûts à flasques en fonte, on a pu reporter en avant l'axe des tourillons, et laisser exercer sur eux la plus grande partie de la réaction de la charge. Cette modification a facilité la manœuvre. Aujourd'hui qu'on ne dresse plus le mortier pour le charger, la manœuvre est beaucoup plus facile encore. En général les mortiers ont des épaisseurs de métal de beaucoup supérieures à celles qui leur sont nécessaires pour résister à la tension des gaz et aux battements ; on pourrait pour les calibres de 10^{po} et de 12^{po} augmenter la longueur de la bouche à feu sans augmenter son poids et sans empêcher de les charger à la main. Cette amélioration serait beaucoup plus avantageuse encore dans les petits mortiers, parce que la bombe est soumise pendant un instant très-court, à l'influence des gaz et que par conséquent les effets produits peuvent être variables, par suite de l'action peu constante des corps vaporisés pendant le premier instant de la combustion. C'est à cette raison qu'il faut attribuer les variations de portées, qui seraient beaucoup moins sensibles si les mortiers avaient plus de 1 calibre 1/2 de longueur.

Les mortiers à la Gomer pouvant tirer avec de très-fortes charges, on a dû donner plus de solidité aux tourillons; pour cela on y a adapté un massif de métal de forme triangulaire que l'on nomme renfort des tourillons.

La lumière des mortiers a le même diamètre que celle des canons. Dans les mortiers à chambre cylindrique le canal de lumière aboutit au fond de la chambre, tandis que dans les mortiers à chambre tronconique il vient aboutir vers le milieu de cette chambre. Dans les mortiers de Gribeauval, le métal était moins épais autour de la chambre.

Le mortier *monstre*, essayé au siége de la citadelle d'Anvers du calibre de 22^{po} était cylindrique extérieurement, c'est pour cela qu'il a fini par éclater. Il résultait de sa forme que l'épaisseur du métal était trop grande autour de la chambre tandis qu'elle était trop faible au renfort.

Pour envoyer des bombes à de grandes distances, les mortiers à âmes courtes n'étant pas suffisans, le colonel Villantroys proposa en 1811 des mortiers à âmes longues, qui portaient jusqu'à 3300^{toises}. Ces mortiers, qui furent construits et employés à différentes occasions, étaient à proprement parler de très-gros obusiers, établis sur des affûts de mortiers et tirés sous un angle de

45°; du reste pour le tir des bouches à la Villantroys, la difficulté principale consistait à composer des fusées qui durassent de 30 à 33 secondes, temps que la bombe mettait à effectuer son trajet : M. Jacquet, commandant la compagnie d'Artificiers, est arrivé à déterminer la forme des fusées qui satisfaisaient à cette condition, en perçant 3 canaux parallèles et communiquant bout par bout.

Les mortiers à la Coëhorn sont de petits mortiers assez légers, des calibres de 6po et de 16, que l'on emploie dans l'attaque et la défense des places contre des rassemblements d'hommes; leur légèreté et la facilité de leur manœuvre les rend souvent précieux.

Les Pierriers sont des bouches à feu encore dans l'enfance et qui ont besoin de nombreuses modifications.

Les Belges ont adopté un mortier du poids de 3000liv. et du calibre de 11po qui, avec une charge de 3liv. de poudre, lance à la fois un grand nombre de boulets à 400m environ. Ils peuvent lancer 64 boulets de 3liv. ou 32 de 6liv. ou 8 de 24liv. ce qui fait plus, de 96liv. de fonte.

Mortier éprouvette.

On appelle mortier éprouvette un petit mortier du calibre de 7 pouces, coulé sur semelle et dont l'axe est incliné à 45°; il sert à essayer les poudres en lançant un projectile du poids de 60liv avec la charge de 3 onces. Cette bouche à feu a une très-grande analogie avec les mortiers. Elle peut bien servir à donner les effets comparatifs des différentes poudres, dans les bouches à feu à âmes courtes; mais son emploi pour essayer les poudres destinées à être tirées dans des pièces à âmes longues n'est plus aussi rigoureux. Dans les expériences nombreuses faites à Esquerde en 1826 et 1827 on a comparé pour toutes les espèces de poudres éprouvées, les résultats obtenus avec l'éprouvette, le fusil pendule et un canon de 4. Dans ces comparaisons les différences d'un coup à l'autre ont été 1/183 pour le canon 1/170 pour le fusil pendule et 1/177 pour l'éprouvette. Constamment l'éprouvette à conservé pour une différence de deux coups successifs la moyenne entre le canon et le fusil pendule.

L'éprouvette est inclinée à 45°, parce que cette inclinaison est celle qui donne la portée maximum dans le vide et qu'on a voulu que l'instrument d'épreuve se rapprochât le plus possible de cette

condition. La charge employée est très-petite et le globe au contraire très-gros et très-pesant, afin que l'effet de la résistance de l'air soit le plus faible possible.

On voit qu'à l'aide de cette éprouvette, en prenant une moyenne de plusieurs coups, on peut apprécier assez exactement, sinon rigoureusement, la force de la poudre. Un grand inconvénient de l'éprouvette c'est qu'elle se dégrade assez rapidement; cela fait que les résultats ne sont plus comparables; ainsi la chambre s'égrène, le vent augmente, et à chaque coup le projectile se déforme dans sa chute. On conçoit que toutes ces circonstances deviennent des causes d'erreur. Afin d'en tenir compte, autant que possible, on prend d'abord la moyenne d'un certain nombre de coups tirés avec une poudre type que l'on conserve avec le plus grand soin et que l'on éprouve de temps en temps pour connaître les variations des portées et par suite l'influence des altérations successives de l'éprouvette.

Dans toutes les poudrières, on fait actuellement usage du fusil pendule, pour les épreuves de poudre à mousquet. Ce fusil est suspendu comme le fusil qu'a employé le chevalier d'Arcy dans ses expériences; il tire sur un pendule balistique, qui se compose d'une masse de plomb d'un poids constant fixé dans une âme en fer. Au moyen de l'amplitude des oscillations, on détermine la vitesse initiale de la balle.

On prend la moyenne de 10 coups à la charge de 10 grammes pour les poudres de guerre et de 5 grammes pour les poudres de chasse.

DES AFFUTS.

Les bouches à feu doivent jouir d'une certaine mobilité pour pouvoir être dirigées avec facilité et promptitude sur le point à battre. D'un autre côté leur stabilité doit être assez grande pour qu'elles ne puissent être renversées lorsqu'on fait feu. Si le sol sur lequel une pièce est placé offre peu de résistance, les crosses s'y enfoncent par l'action du tir, arcboutent, et le système prend un mouvement de rotation autour de celles-ci. Il pourrait même se renverser, si son centre de gravité était assez élevé au-dessus du sol. De plus lorsque les roues reposeraient sur un terrain inégal, l'action des gaz de la poudre, pourrait aussi renverser la pièce autour de la roue la plus basse. Dans chacun de ces cas, il arriverait inévitablement des accidents d'autant plus graves que l'ennemi ne manquerait pas d'activer son feu sur les rassemblements d'hommes qu'exigerait la manœuvre pour relever la pièce. D'un autre côté, il est indispensable que ces pièces éprouvent dans leur mouvement de recul des résistances assez considérables pour en réduire convenablement l'étendue, qui sans cela nécessiterait en arrière de la batterie un grand espace libre, qu'on n'a pas toujours à sa disposition : en d'autres termes le recul des bouches à feu doit être déterminé de manière à ce que l'action de la bouche à feu sur l'affût ne soit pas trop violente, et que le recul ne soit pas gênant. Pour satisfaire à ces deux conditions, on place les bouches à feu sur affûts qui font système avec elles dans le tir, et qui, par suite, augmentant la masse à mouvoir, diminuent la vitesse d'impulsion communiquée par l'explosion de la charge.

Les affûts sont disposés de manière qu'une partie de l'effort exercé est détruite par la résistance du sol et que l'autre est employée à vaincre les frottements occasionnés par la pression due à la partie de l'effort primitif qui a été détruite, et au poids du système. Si la résistance due à la réaction du sol était peu considérable, on serait forcé de construire de très-longues plate-formes, et de donner aux remparts une grande largeur. Sur le champ

de bataille, le recul nécessiterait une manœuvre pénible pour ramener la pièce à sa position en batterie, laquelle étant déterminée de manière à être la plus avantageuse possible doit rester la même. D'un autre côté, si la résistance opposée au recul était assez puissante pour arrêter brusquement l'affût celui-ci ne résisterait qu'un petit nombre de coups. C'est ainsi que dans certaines batteries de Gilbraltar où l'on avait essayé de pratiquer les encastrements des bouches à feu dans la roche elle-même, il a été impossible de les conserver et s'il existe aux Dardanelles des bouches à feu entièrement creusées dans le roc, elle ne se sont conservées que parce qu'elles n'ont tiré qu'une fois à peine en deux siècles.

La résistance qui modère l'étendue du recul est dûe au poids du système. La pression exercée sur le sol produit un frottement capable d'arrêter le mouvement d'impulsion communiqué par l'explosion de la charge. En résumé, il faut que le système oppose de la résistance au recul; mais il faut aussi qu'il n'en oppose pas trop au moment de l'explosion afin que les affûts ne soient pas trop fatigués.

Nous allons chercher à déterminer ces conditions importantes auxquelles doivent satisfaire les dispositions générales des affûts; sans nous occuper du mode de construction, nous nous bornerons à évaluer et à comparer l'effort exercé et les résistances qui s'y opposent.

Il se présente dans le tir un cas particulier, c'est celui où par suite d'un trop grand abaissement des tourillons l'élasticité de la flèche ou du flasque de l'affût tend à relever la culasse aussitôt après le coup. Il y a alors deux mouvements distincts dans le système; le mouvement de rotation de la pièce autour des tourillons et le mouvement de translation ou du recul, qui se trouve nécessairement modifié par le premier. Comme ce cas est purement accidentel, nous ne nous en occuperons pas et nous ne considérerons que celui où la culasse pressant sur l'affût n'éprouve pas de réaction suffisante pour faire soulever la bouche à feu et où le système de la bouche à feu et de son affût se meuvent comme un système invariable.

Pour comparer les forces qui agissent sur l'affût, nous suivrons la même marche que précédemment, lorsqu'il s'est agi d'étudier la répartition de l'effort sur les points d'appui des tourillons et

sur la vis de pointage, et qui consiste à considérer d'abord toutes les forces horizontales, puis les forces verticales et enfin celles qui tendent à imprimer au système un mouvement de rotation.

Les résistances exercées par le sol sont appliquées aux points d'appui des crosses et des roues et les deux résistances partielles des roues peuvent se composer en une seule qui agirait dans le plan vertical passant par l'axe de l'affût. En tenant compte de la quantité de mouvement du système, nous allons établir que dans le cas d'équilibre, la somme des composants parallèles au sol est nulle; qu'il en est de même pour la somme des composants perpendiculaires au sol, et qu'enfin les deux sommes de forces qui tendent à imprimer au système des mouvements de rotation en sens inverses, sont égales entre elles. Nous aurons ainsi trois équations qui nous serviront à déterminer les diverses circonstances du recul.

Soit donc : (fig. 38.)

$m'v'$ la quantité de mouvement imprimée à la bouche à feu.

M V la quantité de mouvement du système entier dans le recul.

θ l'angle que fait l'axe de la bouche à feu avec le sol que nous supposerons horizontal.

C la pression résultante au point d'appui des crosses.

R celle qui agit aux roues.

r le rayon des roues, G le centre de gravité du système, d sa distance à l'axe de la pièce.

f le rapport de la pression au frottement des crosses sur le sol ou sur la plate-forme.

γ la distance des crosses à l'axe de la bouche à feu.

b la distance du point d'appui des roues à celui des crosses.

a la distance du pied de la verticale passant par le centre de gravité, à l'appui des crosses.

h la hauteur du centre de gravité au-dessus du sol.

E la projection de l'axe de l'essieu.

Nous avons vu que l'on avait pour valeur de la quantité générale de mouvement imprimé au système et exercé suivant l'axe de la pièce:

$$m'v' + \frac{\mu}{2} = mv\frac{C_1^2}{R_1^2} + \frac{\mu}{2}v + 420^m . \mu.$$

C_1 et R_1 étant les rayons de l'âme de la bouche à feu et du pro-

jectile, m et μ le poids du boulet et de la charge, v la vitesse du boulet exprimée en mètres parcourus en une seconde.

Par le centre de gravité G menons l'horizontale, lieu de ce centre dans le mouvement du système. Nous avons pour la somme des forces horizontales qui sollicitent le système.

$$m' v' \cos\theta - fR - fC - MV = o. \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

Pour les forces verticales nous avons de même

$$m' v' \sin\theta - R - C = o. \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

Et enfin pour les forces qui tendent à imprimer deux mouvements inverses de rotations autour du point C des crosses

$$\gamma\, m' v' + bR - frR - hMV = o. \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

On a ainsi autant d'équations que d'inconnues. Multipliant les termes de l'équation (2) par f et les retranchant du 1er membre de l'équation (1) on aura:

$$m' v' (\cos\theta - f \sin\theta) = MV.$$

De l'équation (3) on tire

$$R\,(b - fr) = hMV - \gamma\, m' v' = m' v' \{ h (\cos\theta - f \sin\theta) - \gamma \}$$

D'où,

$$R = m'v' \frac{h(\cos\theta - f\sin\theta) - \gamma.}{b - fr}$$

Mais nous avons d'après la figure: $\gamma + a \sin\theta = d + h \cos\theta$; de là, tirant la valeur de γ et la reportant dans la valeur de R on obtient:

$$R = m'v' \frac{(a - fh)\sin\theta - d}{b - fr}.$$

Maintenant de l'équation (2) nous tirons

$$C = m'v' \sin\theta - R = m'v' \sin\theta - m'v' \frac{\{(a - fh)\sin\theta - d\}}{b - fr}$$

Si, sans changer la position du centre de gravité, nous supposons que les crosses s'en rapprochent, d reste constant, tandis que a et b diminuent de la même quantité; il résulte de là que la valeur de R diminue et que par suite C augmente.

R peut diminuer jusqu'à devenir négatif; cela a lieu au-delà du point pour lequel $(a - fh)\sin\theta - d = o$, à ce point $R = o$, $C = m'v' \sin\theta$ et l'effort supporté par l'essieu est nul. Au-delà, R devenant négatif, le système commencerait à tourner autour des crosses. Pour que la tête de l'affût ne tende pas à être soulevée il faut donc que $(a - fh)\sin\theta - d > o$ ou bien que $(a - fh)\sin\theta > d$.

Il est facile d'exprimer cette relation par un tracé graphique,

(fig. 39.) En effet, si par le point C d'appui des crosses on mène les lignes CC', faisant avec la verticale CP et du côté opposé au mouvement, c'est-à-dire du côté où s'exerce le frottement, un angle dont la tangente trigonométrique soit égale au rapport du frottement à la pression, et qui coupe l'horizontale passant par le centre de gravité G en un point C', on aura : $C'P=fh$, et $a-fh=GC$; or $GQ=GC' \sin \theta = (a-fh) \sin \theta$, donc pour que l'inégalité $(a-fh) \sin \theta > d$ ait lieu, il faut que l'on ait $GQ-d>0$ ou $GQ>d$, ce qui ne peut avoir lieu que lorsque le point C', qui est celui où la ligne formant l'angle de frottement avec la verticale et menée par le point d'appui des crosses vient couper l'horizontale menée par le centre de gravité, est en arrière du point O, qui est celui où l'axe de la bouche à feu coupe la même horizontale.

On peut de même se rendre compte par un tracé graphique de toutes les actions qui ont lieu dans le recul. Remarquons d'abord que les forces qui sont appliquées au point C et qui agissent sur l'affût sont la pression C et le frottement Cf; elles ont une résultante unique et la direction de celle-ci fait avec la verticale un angle dont la tangente trigonométrique est $\frac{fC}{C}=f$

On trouverait de même que la pression E, composée avec le frottement qu'elle produit, aura une résultante unique dont la direction ferait avec la verticale un angle dont la tangente trigonométrique serait aussi égale au rapport du frottement à la pression.

Cela posé, menons par le centre de gravité G du système l'horizontale MN qui rencontre en O l'axe de la bouche à feu. (fig. 40) Soit C le point d'appui des crosses et E la projection verticale de l'axe de l'essieu, et soit f l'angle de frottement : le problème se réduit à l'équilibre d'un système de forces parallèles et tout se passe alors comme si O était le point d'application des forces $m'v'$ et MV qui sollicitent le système, et comme si C' et E' étaient les points où sont appliquées les pressions composantes. Ces pressions et leurs effets varient suivant que le point O est plus ou moins rapproché des points E et C. On voit que la pression sur les crosses est d'autant plus grande que O est plus près de C'; on voit de même que plus E' est rapproché de O, plus l'effort que l'essieu supporte est grand. Si les crosses se rapprochent de l'essieu et viennent

en C_{13} par exemple, il arrive que la ligne qui fait avec la verticale en ce point, l'angle du frottement, passe précisément par le point O ; alors les crosses ont à supporter l'effort entier tandis que l'essieu ne supporte aucune pression. Si le point C est transporté en C_2 et si par suite C'_2 est en avant de O, l'essieu E peut-être soulevé ; le système tendra alors à prendre un mouvement de rotation autour des crosses. On voit par là qu'à mesure qu'on diminue la longueur des crosses on diminue l'effort exercé sur l'essieu et on pourra même atteindre une dimension telle que l'affût culbute. En portant l'essieu en avant, on diminue l'effort qu'il éprouve ; le contraire a lieu en le portant en arrière. Du reste il ne peut être reculé au delà du point G, puisqu'alors le système ne saurait avoir de stabilité même au repos.

D'après ce que nous venons de dire, on voit que les anciens affûts dont les crosses étaient extrêmement longues auraient eu un recul très-grand si leur poids eut été plus considérable ; et qu'en diminuant leur longueur, on a dû augmenter leur résistance. On voit enfin que plus les angles de projection sont grands plus les essieux et les crosses sont fatigués.

L'effort exercé par la poudre et la résistance du sol, étant connus, on peut déterminer le mouvement que doit prendre le système. Si le frottement était très-faible le recul pourrait être très-grand et aller même de 20 à 30^m; mais en général le terrain est mou et le frottement assez considérable; par suite l'affût est arrêté quand la somme des résistances dues au frottement est devenue égale à la puissance de l'impulsion, communiquée par l'explosion de la charge. On voit qu'on peut ainsi arriver à la mise en équation, et que la méthode à suivre est la même que dans le cas d'un corps lancé en l'air et dont on calcule la hauteur d'ascension. Il faut seulement ici remplacer l'expression de la pesanteur par celle du frottement.

On va appliquer ce calcul aux affûts de mortiers, et évaluer leur recul, en prenant pour le frottement celui de la fonte sur le bois de chêne à fibres perpendiculaires au sens du frottement. Ce frottement est bien déterminé dans le cas où le bois est sec ; mais ordinairement lesplates-formes sont humides et le plus souvent encore il s'interpose entre elles et les affûts, de la terre et du gravier qui modifient le recul d'une manière assez sensible. Voici le tableau des résultats obtenus par le calcul.

MORTIERS.

Plate-forme sèche, $f = \frac{1}{3}$	A LA GOMER.			A CHAMBRE CYLINDRIQUE.				OBSERVATIONS.
CALIBRES	12°	10°	8°	12°	10° G. P.	10° PP.	8°	
Poids du système	5527^{tt}	4746	1585	5766	4666	5559	1570	Le recul est nul pour
Poids du projectile	147^{tt}	100	45	147	100	100	45	$\cos\theta = f \sin\theta$ ou
Poids de la charge	11^{tt}	$7^{tt}8^{o}$	2^{tt}	$5^{tt}7^{o}$	$7^{tt}4^{o}$	4^{tt}	$1^{tt}5^{o}$	pour 71°,54'.
Vitesse de la bombe	650^{p}	650	500	480	650	460	410	
v' vitesse du système $\frac{\left(m + \frac{\mu}{2}\right)v}{M + \frac{\mu}{2}}$	18p6p	14p2	16,0	12,4	14,5	14,0	15,1	
V vitesse du recul $= v'(\cos\theta - f\sin\theta)$	8p7p	6p7	7p5	5p8	6p7	6p6	6p2	
Longueur du recul $x = \frac{v^2}{2fg}$	5p80	2p25	2p80	1p68	2p25	2p28	1p95	

Ces longueurs de recul sont à peu de chose près ce que l'on a observé dans l'expérience ; mais comme la face supérieure des lambourdes de la plate-forme ne forme pas un plan continu, l'affût peut en heurter les arêtes saillantes. Cette circonstance diminue le recul réel. Dans le tir des mortiers sous des angles très-petits à l'horizon, le système peut, comme pour les affûts à rouages, être renversé par l'effort de l'explosion de la charge. D'ailleurs, pour tirer les mortiers sous de petits angles, il faut les établir sur des plates-formes inclinées de l'arrière à l'avant, parce que la construction de leurs affûts ne permet pas de les diriger au-dessous de l'angle de 30°.

Quant les mortiers tirent sous l'angle de 71°, 34' la relation $\cos\theta = f\sin\theta$ se trouve satisfaite, et par suite il n'y a pas de recul parce que le frottement ne peut être surmonté. Dans ce cas il résulte de la compressibilité du bois des plates-formes que l'affût reçoit une certaine secousse apparente. Du reste les flasques supportent l'effort tout entier et le transmettent à la plate-forme qui peut être brisée, ou au terrain qui peut être enfoncé.

Les résultats qui sont donnés dans le tableau précédent sont ceux que l'on obtient pour une plate-forme sèche ; si la plate-forme est mouillée ou graissée, l'angle sous lequel le recul cesse d'avoir lieu est de 75° 57.

Les mortiers à la Villantrois lançaient des projectiles de 150^{tt} à 3300 toises ; leur recul était très-considérable, ils étaient très-longs et très-épais, afin de pouvoir résister aux charges avec lesquelles on les tirait et qui pouvaient dépasser 40^{tt}. Leurs affûts étaient très-lourds, et les plates-formes sur lesquelles ils étaient établis étaient solidement construites, en charpente sur pilot. En appliquant à ce mortier la même méthode de calcul que pour les mortiers ordinaires, on arrive à la série des résultats suivants :

MORTIERS A LA VILLANTROIS.

Tiré à 45° et 11. $f=\frac{1}{3}$	EN BRONZE DU CALIBRE DE			EN FONTE DU CALIBRE DE 11po	OBSERVATIONS.
CALIBRES	9°	10°	11°		
Poids du système, mortier et affût .	13246tt	15200tt	19294tt	38535tt à 28435tt	
Poids du projectile	92	106 à 178	175	172 à 180*	* avec sabot
Poids de la charge.	30 à 35tt	33	40 à 50	30 à 60	
Plus grande vitesse de la bombe (pieds par seconde)	1420 à 1500	1360 à 1100	1170 à 1320	1035 à 1440	
Vitesse v' du système (pieds par seconde)	12,1 à 13,1	18,7 à 23,5	12,6 à 14,5	7,2 à 11,2	
Vitesse du recul ———i.l.———. .	6p5 à 7,0	8,8 à 11	6,8 à 7,8	3,4 à 5,3	
Longueur du recul (pieds)	2p1 à 2,4	3p9 à 6	2p3 à 3	0,58 à 1,4	Recul nul pour 75° — 57'.

Pour les mortiers de 10p° en bronze la série a été la suivante entre les deux limites données plus haut.

Poids du projectile	106tt	122tt	137tt	160tt	178tt
Poids de la charge	33tt	33tt	33tt	33tt	33tt
Rapport des deux poids	$\frac{1}{3,5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4,4}$	$\frac{1}{5,1}$	$\frac{1}{5,7}$
Vîtesse de recul	8,8	9,3	9,8	10,3	11
Longueur du recul (pieds)	3,9	4,3	4,8	5,3	6
Vîtesse du système	18,7	19,7	20,8	22	23,5

Voici maintenant la série des résultats correspondants

$f=\frac{1}{4}$ obtenus dans les expériences faites à Séville.

Vîtesse du système	7p,2 à 7p,8	9,9 à 12,4	7,5 à 8,6	3,8 à 5,9
Vîtesse du recul	2 à 3p	4,5 à 6,6	3 à 31/2	1 à 2,1
Longueur du recul	3p45 à 4 0	6,5 à 9,8	3,75 à 4,9	0,05 à 2,3
				Recul nul sous 80°-33

Pour les mortiers de 10p° en bronze on a obtenu la série suivante :

Vîtesse du système. .	9p,9	10p,4	11p	11p,6	12p,4
Vîtesse du recul. . .	4 ,5	5 ,0	5 ,5	6 ,6	6 ,6
Longueur du recul. .	6 ,5	6 ,9	8 ,0	8 ,9	9 ,8

Ces mortiers tirés sous l'angle de 73°—37' n'auraient pas dû donner de recul; mais ce n'est que sous l'angle de 80°—33' que ce phénomène s'est présenté.

L'affût de côte de Gribeauval repose sur son chassis par deux rouleaux en bois; le frottement qu'ils éprouvent dans le recul serait peu considérable sans les entailles pratiquées à la partie inférieure des flasques et dans lesquelles les rouleaux s'adaptent. Par suite de cette construction, le mouvement n'est pas plus facile que si les rouleaux n'existaient pas. Il faut donc encore pour tenir compte du frottement de l'affût sur le chassis, considérer le cas où ce frottement s'exerce dans le sens des fibres. Voici la série des résultats obtenus pour la pièce de 24 qui avec son affût pèse 7300tt et dont le boulet ensaboté pèse 26tt.

TIR DU CANON DE 24.

	SANS SABOTS.					AVEC SABOTS.				
Charges	6tt	8tt	10tt	11tt	12tt	6tt	8tt	10tt	11tt	12tt
Vitesse du boulet . . .	1370p	1425p	1475p	1510p	1530p	1370p	1425p	1475p	1510p	1580p
Vitesse du système à 0°	3p,05	3p,5	3p,85	6p1	6p,3	5p45	5p,90	6p,25	6p,5	6p.7
——id.—— à 8° $f=\frac{1}{3}$	4,75	5,2	5,5	5,7	5,9	5,15	5,6	5,9	6,1	6.3
——id.—— à 8° $f=\frac{1}{6}$	4,9	5,3	5,65	5,9	6,1	5,30	5.7	6,0	6.3	6,5
Recul à . . . 0° $f=\frac{1}{6}$	2,55	3,04	3,44	3,74	3,95	2,97	3,50	3.9	4,24	4.5
Recul à . . . 8° $f=\frac{1}{6}$	2,25	2,70	3,40	3,25	3,50	2,65	3,14	3,50	3,70	3.96
Reculs obtenus avec chassis secs, à 0°	3,01	4,02	3,3	3,2	4,1	2,97	3,50	3,4	4,2	4.6
Reculs obtenus avec chassis secs, à 8°	»	3,80	4,70	5,06	6,8	»	3,80	5,00	5,90	6,40
Recul obtenu avec chassis mouillé à 8°.	»	7,30	8,73	8,75	8,77	»	6,65	8,40	8,77	8.78

Quant aux autres affûts, il n'y a pas seulement à considérer un mouvement de glissement mais encore celui de roulement ; les roues ainsi diminuent l'effort nécessaire pour mettre le système en mouvement ; d'ailleurs, dans le recul, le mouvement est si vif que d'abord les roues frottent sur le sol avant de tourner, puis tournent un peu en frottant encore sur le sol et sur l'essieu, et ce n'est qu'un peu plus tard qu'elles finissent par rouler seulement.

Jusqu'à présent nous avons négligé l'effet de la pesanteur de la pièce et de l'affût, dans le calcul des efforts du recul, parce qu'il était très-faible relativement aux pressions ; mais dans le cas où l'affût peut prendre un mouvement de rotation autour des crosses, il faut nécessairement en tenir compte, puisque dans ce mouvement, la pesanteur agit seule pour contrebalancer le soulèvement du système autour des crosses ; elle agit pendant tout le temps nécessaire pour vaincre la force motrice, après quoi, le mouvement d'ascension cesse et la pièce retombe dans sa position primitive.

En conservant les notations que nous avons adoptées précédemment et en appelant r' le rayon de l'essieu, les formules que nous avons trouvées deviennent :

$$m'v' \cos\theta - f\left\{C + R\frac{r'}{r}\right\} - MV = 0,$$

Pour les forces horizontales ;

$$P + m'v' \sin\theta - \left\{C + R\right\} = 0.$$

Pour les forces verticales ; et

$$\gamma\, m'v' + \left\{b - fr'\right\} R - h\, MV - a\, P = 0.$$

Pour les sommes des forces qui tendent à produire un mouvement de rotation autour des crosses.

Retranchant la 2e équation de la 1re après l'avoir multipliée par f il vient :

$$m'v' \left\{\cos\theta - f\sin\theta\right\} - Pf + Rf\left\{\frac{r - r'}{r}\right\} - MV = 0,$$

multipliant cette équation par h et en retranchant la troisième, il vient : (fig. 41.)

$$m'v' \left\{(\cos\theta - f\sin\theta)\, h - \gamma\right\} + P\,(a - fh) + R\left(fh\frac{r - r'}{r} + fr' - b\right) = 0.$$

Remarquant que d'après la figure précédente on a

$$\gamma + a \sin \theta = d + h \cos \theta.$$

On tirera pour la valeur de R

$$R = \frac{m' v' \{d - (a - fh) \sin \theta\} - P(a - fh)}{r\{b - f.(h + r')\} + fhr'} r.$$

Le dénominateur de cette valeur étant toujours positif, pour que le mouvement de rotation ait lieu il faut que le numérateur de la valeur de R soit positif et pour que le mouvement n'ait pas lieu, il faut que le numérateur soit nul: dans ce cas.

d'où
$$m'v'\{d - (a - fh) \sin \theta\} - P(a - fh) = o,$$

$$P = \frac{m'v'(d - (a - fh) \sin \theta}{a - fh}$$

Si le mouvement a lieu, il ne cessera qu'au bout du temps t que donne la relation

$$m'gt = \frac{m'v'(d - (a - fh) \sin \theta}{a - fh},$$

ou bien

$$t = \frac{v'(d - (a - fh) \sin \theta)}{g(a - fh)}$$

On pourra avoir la hauteur à laquelle le centre de gravité du système aura été soulevé, puisque pendant ce temps la pesanteur lui fait parcourir un espace $H = \frac{gt^2}{2}$; la hauteur du soulèvement sera donc

$$\frac{1}{2} gt^2 = H = \frac{v'^2(d - (a - fh) \sin \theta)^2}{2g(a - fh)^2}$$

Dans le cas où le centre de gravité serait sur l'axe on aurait $d = o$. Il faudrait alors que $\sin \theta$ fut négatif pour qu'il y eut soulèvement de l'affût et on aurait

$$H = \frac{v'^2 \sin^2 \theta}{2g}.$$

Enfin dans le tir horizontal pour lequel $\theta = o$, on aura

$$H = \frac{v'^2 d^2}{2g(a - fh)^2}$$

Appliquons ces formules à l'affût de 12 de campagne pour lequel $d=0^m,17$, $a=1^m,92$, $h=0^m,96$; la charge étant au 1/3 du poids du boulet, le poids du système $=1560^k$, celui du boulet 6^k, la vitesse initiale de celui-ci$=493^m$, la vitesse du système $v'=2^m,20$ et le frottement sur le sol ou la plate-forme en chêne $f=1/2$. En substituant toutes ces valeurs dans les formules précédentes on trouve $H=0^m,0028$. Dans le cas où le terrain est assez mou la valeur de f devient$=1$; alors $H=0^m,0078$.

On voit donc que le soulèvement est toujours extrêmement faible pour l'affût de 12 de campagne. Si l'on cherche la valeur de l'angle de tir qui donne un mouvement de rotation nul, en conservant l'hypothèse de $f=1/3$, on trouve que l'angle θ cherché$=6°,6'$. Pour $f=1$, cet angle devient $\theta=10°,10'$.

Il résulte de là, que généralement il y a un soulèvement de l'affût dans le tir du canon de 12 de campagne, puisque l'angle de tir est presque toujours inférieur à celui pour lequel le soulèvement serait nul: cet angle est d'ailleurs donné par la relation,

$$d-(a-fh)\sin\theta=0.$$

Plus les crosses sont éloignées, plus a augmente et plus la valeur de H diminue. Aussi dans les affûts de montagne dont les crosses sont très-inclinées, le soulèvement se manifeste fréquemment. On a dans l'affût de montagne actuel, en prenant $f=1/3$, la vitesse du système $v'=5^m$, $d=0^m,11$, $a=1^m,00$, $h=0^m,60$ et par suite on obtient $H=0^m,0245$ ou environ 15 lignes.

Si la valeur de H devient plus grande que la différence qui existe entre la distance du centre de gravité aux crosses et sa hauteur au-dessus du sol, le mouvement vertical de la tête de l'affût ne peut être anéanti par l'action de la pesanteur, et le système doit être complètement renversé.

Dans le cas de l'affût de montagne, la distance du centre de gravité à l'extrémité des crosses est de $1^m,20$, $h=0^m,60$; donc il faut que H soit plus grand que $0^m,60$ pour qu'il y ait renversement; dans ce cas, puisque

$$H=\frac{v'^2(d-(a-fh)\sin\theta)^2}{2g(a-fh)^2}$$

on aura

$$\sqrt{2gH}=\frac{v'(d-(a-fh)\sin\theta)}{a-fh}$$

mais $\sqrt{2gH} = 3^m, 42$, on doit donc avoir

$$3^m, 42 = \frac{v(d-(a-fh) \sin \theta)}{a-fh},$$

de là on tire

$$\sin \theta = -\frac{0,437}{0,800} \text{ d'où } \theta = -33^o, 7'.$$

L'angle de tir doit donc être de 33°,7' au-dessous de l'horizon Mais sur un terrain horizontal, la construction de l'affût ne permet pas de tirer sous un angle inférieur à 8°; par suite il ne peut y avoir renversement de l'affût de montagne, que lorsque cet affût se trouve placé sur un terrain fortement incliné.

Pour les affûts de campagne, il faudrait encore des angles beaucoup plus grands pour produire le renversement, Pour le 12, par exemple, il faudrait que le soulèvement fut de $1^m,44$ ce qui n'est pas possible, parce que la vitesse du système n'est pas assez grande.

L'essieu court peu de risque, d'être faussé dans le soulèvement de l'affût à cause du faible poids des roues qui agissent sur lui pendant ce mouvement. Il n'en est pas de même dans le cas où l'affût se trouve, par suite de l'action du tir, violemmen t pressé contre le sol par le poids du système et par l'effet des gaz de la poudre. Du reste, dans les cas ordinaires, le soulèvement est à peine sensible, et on peut calculer le mouvement du système, sans en tenir compte.

Connaissant les efforts que les affûts ont à suppprter, on peut estimer la résistance dont les diverses parties doivent être capables. Nous avons vu qu'ils étaient sollicités par quatre forces, appliquées au point d'appui des tourillons, à la vis de pointage, aux crosses et à l'essieu ou aux roues. Pour évaluer la résistance des affûts, il faut connaître leur construction et le mode d'assemblage des parties qui les composent. On suppose dans le calcul que les affûts sont rigides et inflexibles; cette hypothèse n'est pas absolument rigoureuse puisqu'il se présente souvent dans le tir un relèvement de culasse, qui prouve que l'affût est compressible et élastique. Dans l'état actuel de la science il est impossible de tenir compte de cette flexibilité; on peut seulement apprécier les effets des différentes forces appliquées aux affûts.

Le système étant emporté avec une certaine vitesse, ce sont les tourillons qui transmettent à l'affût la pression nécessaire pour

imprimer cette vîtesse au système; il faut par conséquent appliquer sous les tourillons des ferrures qui soient assez fortes pour empêcher l'affût d'être notablement déprimé. Cette dépression se fait violemment sentir dans les affûts de mortiers construits en bois ; les encastrements sont promptement mis hors de service. Cela a lieu même avec les mortiers nouveaux parce que ce sont les encastrements des tourillons qui ont seuls à supporter l'effort de la bouche à feu.

Dans les anciens mortiers et dans les mortiers actuellement adoptés en Angleterre, les tourillons sont adaptés au cul du mortier : par suite il appuie sur l'affût par toute la partie inférieure du mortier. Cette disposition est la seule qui permette de tirer les mortiers sur des affûts en bois.

Dans les affûts de campagne et de siége, où les encastrements sont garnis de fortes sous-bandes, cette dépression n'a pas lieu. Les encastrements des tourillons dans les affûts de place et de côte anciens et nouveaux, sont sans ferrure, mais les bouches à feu qui sont montées sur ces affûts, sont fort pesantes et par suite elles sont douées d'une grande inertie qui fait que la vîtesse qui leur est communiquée est faible et que la pression des tourillons est moins considérable. Ces affûts sont d'ailleurs construits en bois de chêne de la meilleure qualité, et l'on ne peut établir de comparaison entre des canons qui pèsent jusqu'à 280 fois leur projectile et des mortiers qui ne pèsent que 20 à 25 fois le leur.

Dans les affûts de Gribeauval, les tourillons transmettent aux crosses, par une même pièce de bois, l'effort qu'ils reçoivent, mais dans les affûts nouveaux, cet effort est transmis par deux pièces différentes. Les rondelles d'asssemblage de ces deux pièces ont donc une grande action à supporter. L'essieu reçoit une partie de cette action ; par suite, il presse la flèche et les flasques. Comme dans ces affûts, une partie de la solidité du système réside dans l'essieu, il a été nécessaire de modifier celui de Gribeauval et d'en adopter un plus résistant.

Un autre effort a lieu sur la vis de pointage par suite de l'abaissement de l'axe des tourillons ; cet effort est moins considérable dans les affûts de campagne que dans les affûts de siége. Comme il agit à peu près perpendiculairement aux fibres du bois qui compose la flèche, on peut l'assimiler à l'effort qu'un poids exercerait

sur une pièce de bois fixée par ses deux extrémités et qu'il tendrait à faire fléchir. On sait que si le poids est appliqué au milieu d'une pièce, la résistance de celle-ci est en raison directe de son épaisseur et du carré de sa hauteur et en raison inverse de sa longueur. Mais cette comparaison n'est pas tout-à-fait exacte dans le cas qui nous occupe.

Les essieux ont à résister d'après ce que nous avons vu à une pression qui agit tantôt de haut en bas, et tantôt de bas en haut. Ils se trouvent ainsi dans le cas d'une verge fixée par deux points et pressée par un poids ; par suite on peut y appliquer les calculs sur la résistance des matériaux. Quant à la résistance des roues, il faut avant de s'en occuper, connaître exactement leur construction. A mesure que l'angle de tir augmente, l'effort sur les crosses et sur les essieux augmente ; par suite il faut augmenter la résistance des affûts avec l'angle sous lequel doivent tirer les bouches à feu qu'ils sont destinés à porter.

Dans les affûts ordinaires de mortiers, les flasques sont susceptibles d'une très-grande résistance et ne peuvent céder que par l'écrasement de la partie, d'ailleurs assez épaisse, qui se trouve au-dessous des tourillons. Il est évident que le plus grand effort qu'ils puissent supporter est celui qui a lieu quand l'angle de tir est tel que le recul soit annulé, ce qui a lieu quand cet angle =70°,54'.

En comparant l'effort que les tourillons exercent sur leurs encastrements et la résistance des flasques à l'écrasement, on trouve que cette résistance est de beaucoup supérieure à la première force. Mais ce n'est pas seulement à l'écrasement que les flasques doivent résister ; en effet les plates-formes des mortiers étant composées de lambourdes juxta-posées plus ou moins compressibles, il peut arriver que la surface supérieure des lambourdes ne forme pas un plan continu et que la partie inférieure de l'affût du mortier appuie par ses deux extrémités, tandis que le milieu répond à un porte à faux : dans ce cas la résistance des flasques se trouve diminuée, et il peut arriver que leur rupture ait lieu. Aussi doit-on apporter beaucoup de soins dans la construction des plates-formes de mortiers. A l'appui de ce que nous venons de dire nous citerons un fait arrivé à Auxonne. Un mortier mis en batterie sur une plate-forme fort inclinée, et tiré sous un angle tel que le tire était pres-

que perpendiculaire à la plate-forme a brisé son affût par suite d'un porte à faux.

Les nouveaux obusieurs de 24, surtout dans le tir à balles, brisent par fois leurs affûts, quand le bois n'est pas bien sain. Ces affûts qui sont doués d'une résistance plus que suffisante pour le canon de 8, se trouvent alors avoir à supporter l'action d'un projectile beaucoup plus lourd; et comme cette action a précisément lieu en un point où la flèche se trouve affaiblie par différents trous dont elle est percée, il arrive que celle-ci peut se briser. Cependant les dimensions de ces affûts devraient être suffisantes, pour leur donner toute la résistance nécessaire dans ce tir : aussi ces accidents n'ont-ils encore eu lieu que dans deux écoles, où les bois de construction employés à la confection des affûts ne sont pas d'une excellente qualité.

Les efforts que les affûts ont à supporter dans certains tirs extraordinaires sont tels qu'on est obligé de donner aux affûts des dimensions très-grandes. Pour les mortiers à la Villantrois, par exemple, qui furent employés devant Cadix et qui lançaient des bombes de 150^{tt} à 160^{tt} avec des charges de 33^{tt} à 40^{tt}, les affûts avaient 6^{pi}—7^{po}—6^{li} de longueur, 2^{pi}—4^{po}—9^{li} de hauteur et 5°—6^{li} d'épaisseur, pour chaque flasque.

La marine Anglaise a adopté un mortier en fonte du calibre de 13^{po}, qui lance une bombe de 198^{tt}, avec une charge de 32^{tt}; ce mortier pèse 100 quintaux (*le quintal étant égal à* 50^{kil} 8048) et son affût en pèse 80. Une entretoise en bronze réunit les deux flasques à l'aide de boulons d'assemblage et porte une rigole dans laquelle se loge le cylindre des tourillons, qui appuie dans toute sa longueur.

Les Anglais on encore un mortier du même calibre de 13^{po} qui ne tire qu'à la charge de 20^{tt} et pèse 82 quintaux; l'affût pèse 50 quintaux. Du reste ils se servent aussi d'affûts en bois d'un seul bloc qui pèsent, savoir :

21 quintaux 1/2 pour le 13^{po}.
10 quintaux pour le 10^{po}.
6 quintaux 1/5 pour le 8^{po}
1 quintal 1/2 pour le 5^{po} 1/2
et 15^{tt} pour le 4^{po} 2/5.

En France tous les affûts de mortiers actuellement en usage ont leurs flasques en fonte.

Nous allons passer une revue de diverses espèces d'affûts qui avaient à remplir des conditions extraordinaires ; celles-ci ont déterminé leur mode spécial de construction. Cet examen servira , à faire voir comment un officier d'artillerie doit tirer parti des ressources qui sont à sa disposition , suivant les circonstances où il se trouve placé , et comment il pourra opérer dans les divers cas qui peuvent se présenter.

Pour défendre les forteresses et les points situés sur des hauteurs, on a besoin des feux de l'artillerie parce qu'ils peuvent , seuls en protéger efficacement les approches. Cependant avec les affûts ordinaires en usage on ne peut guère tirer sous un angle plus abaissé que 10° au-dessous de l'horizon. Il y aura donc tel cas où l'emploi de ces affûts pour les services que peut rendre l'artillerie serait nul , comme par exemple , lorsque d'un point élevé il faut arrêter des troupes assez rapprochées du point à défendre. Le premier moyen auquel on ait recours dans ce cas, est l'inclinaison de la plate-forme ; mais cette inclinaison ne saurait dépasser une limite assez rapprochée , surtout avec les affûts à rouages qui rentreraient d'eux-mêmes en batterie avec une vîtesse capable de leur faire franchir les arètoirs. Il faut donc établir des affûts particuliers; on les nomme affûts de dépression et il sont en usage dans plusieurs localités étrangères. Nous allons donner une idée de ceux qui sont empoyés dans quelques forteresses de la Saxe et à Gibraltar , du côté de la terre.

L'affût se compose d'un corps d'affût d'un seul bloc glissant sur deux poutres à tête délardée , qui posent par un rouleau adapté à leur partie antérieure sur un chassis mobile supporté par quatre roulettes; les poutres mobiles peuvent tourner autour du rouleau d'appui et par suite l'axe de la bouche à feu peut recevoir l'inclinaison que l'on veut. (fig. 42.) Pour de très-petites variations au-dessous du tir horizontal, un coin placé entre les poutres mobiles et le chassis peut suffire; mais pour pointer sous de grands angles on a dû adopter un autre système qui élève la queue de l'affût. Il consiste en deux axes montants fixés sur la queue du chassis, portant des trous destinés à recevoir une cheville qui traverse les deux poutres mobiles et les fixe ainsi à la hauteur voulue. Des chevilles rivées sont fixées dans la convexité et la concavité des deux arcs pour servir d'appui aux leviers à l'aide desquels on soulève l'affût. A

Gibraltar, ce système d'arcs montans à chevilles est remplacé par une poutre verticale entaillée en crémaillère.

Un autre système est encore adapté à Gibraltar, du côté de la terre où les rochers qui dominent la plaine, ne présentaient aucun emplacement favorable pour établir des plates-formes: on a creusé dans le roc des espèces de casemates dans lesquelles on a établi les pièces de la manière suivante : (fig. 43.)

Une poutre susceptible de tourner sur une cheville ouvrière scellée dans le roc est suspendue par une poulie ; à cette poutre sont fixés deux montants en fer qui viennent saisir la pièce l'un aux tourillons et l'autre au collet du bouton de la culasse; ce dernier montant se compose de deux parties reliées entre elles par une sorte de vis de pointage à deux filets inverses qui par un seul mouvement de rotation éloigne ou rapproche le canon de la poutre. (fig. 44.) On voit que le système est disposé de manière à donner à l'axe de la pièce telle inclinaison que l'on veut au-dessous de l'horizon. La résistance qu'ont à supporter les points de suspension est diminuée par le mouvement de recul que peut prendre le système.

Les plus grands efforts que les affûts ayent à supporter, ont lieu, comme on l'a dit, dans la direction de l'appui des tourillons aux crosses. Gribeauval, pour donner aux flasques des affûts de côte une résistance suffisante les a composés de pièces de bois superposées, assemblées au trait de Jupiter, et garnis de goujons pour empêcher le glissement des uns sur les autres; (fig. 45.) de plus ces pièces ont été fortement reliées entre elles par des chevilles qui les traversent en entier.

Dans l'affût de place et de côte du nouveau modèle on a substitué à ces flasques pleins une pièce de bois dont les fibres sont placées dans la direction de l'effort à supporter, afin qu'elle soit douée de la plus grande résistance possible. (fig. 46.) L'affût devant supporter dans l'état de repos des bouches à feu de grands poids, on a placé directement sous l'encastrement des tourillons, une pièce de bois presque verticale qui résiste ainsi dans le sens de ses fibres et qui vient se terminer au point d'appui de l'affût sur son chassis. Dans les affûts de métal, on a cherché à remplir les mêmes conditions et l'on a construit deux branches dont le but est le même que celui des montants et arcs-boutants du nouvel affût de place et de côte ; seulement la branche dirigée des tourillons aux

crosses a dû être coudée pour que le coin de mire fut capable d'amener la pièce dans la position de tir. (fig. 47.) En général, on voit que quelque soit le système employé, on cherche à rendre l'affût le plus résistant possible dans le sens de l'effort des tourillons aux crosses.

Les affûts de métal sont en fer forgé et en fonte, et l'on a cherché à leur donner les dispositions les plus simples possibles. Quand on emploie la fonte, il faut éviter autant que possible avec ce métal très-cassant les pièces longues qui peuvent se rompre facilement. Dans les colonies, les pluies chaudes amènent promptement la détérioration du bois exposé à l'air ; on a dû renoncer à l'employer dans la construction des affûts, et comme il est de toute nécessité dans les ports et les rades d'avoir constamment des pièces en batterie, les Anglais ont construit des affûts en fonte composés de deux flasques évidés, partout où l'on a pu le faire sans inconvénient, et réunis par les deux corps d'essieu et par deux boulons d'assemblage. (fig. 48.)

Ces affûts ont les poids suivants :

Calibres.	*Poids en quintaux.*
32	25 1/2
24	20
18	16 3/4
12	16 1/4
9	15
6	14 3/4

Pour ces différents calibres il n'y a que trois numéros de flasques et les différences de poids proviennent des différentes dimensions des entretoises.

Ces affûts en fonte ont du reste de graves inconvénients lorsqu'ils portent des pièces également en fonte. Il peut arriver qu'avec de fortes charges l'affût soit brisé par le choc des tourillons. Cela peut arriver même à la charge du 1/3 du poids du boulet ; aussi n'emploie-t-on que la charge de 1/4. Avec les pièces en bronze cet inconvénient n'a plus lieu. D'un autre côté si l'ennemi tire sur les batteries où il se trouve de pareils affûts, un seul coup de boulet suffit pour mettre l'affût tout entier en morceaux ; ceux-ci sont lancés comme de la mitraille et peuvent causer les plus grands

ravages dans la batterie. Il est vrai que ces affûts n'étant employés que sur les côtes et à l'entrée des rades, ces accidents sont peu à craindre.

En 1834 on a essayé à Lafère des affûts en fer et en fonte, qui n'ont pu résister même à des projectiles creux. Ainsi, des obus de 24 les ont fait du premier coup voler en éclats. Il est donc de toute impossibilité de pouvoir adopter les affûts en métal, pour tout autre usage que celui des côtes où les ricochets sont très-peu à craindre.

Gribeauval, en rapprochant dans l'affût de campagne les crosses du point d'appui des roues, avait augmenté considérablement l'effort qu'avaient à supporter les affûts; aussi avait-il été obligé de les renforcer par des ferrures beaucoup plus nombreuses que dans les affûts de siége. Cet inconvénient a fait chercher à plusieurs reprises d'autres dispositions qui puissent donner aux affûts la résistance nécessaire. Les Anglais ont construit de deux pièces les parties qui résistent à l'action de la bouche à feu et à la réaction du terrain : mais ils ont apporté les plus grands soins à l'assemblage de ces pièces. C'est faute d'avoir mis les mêmes soins à cette construction, que les affûts construits d'après ce principe en Suède et en Prusse n'ont pas présenté de résultats favorables.

Les Anglais qui ont adopté des obusiers de 8po et même de 10po, dont les projectiles ont un poids très-fort et qui peut dépasser 150tt ont eu à construire des affûts très-solides, mais ils sont peu commodes à manœuvrer. Ces affûts se composent de deux grands plateaux en bois servant de flasques et qui reposent à leur partie postérieure par une poutrelle ou traverse, qui glisse toute entière à frottement sur le sol. (fig. 49.) Ces deux espèces d'appui ont dû être déterminées ainsi pour modérer efficacement le recul; sans cela, il eût été très-considérable. L'effet n'en est pas moins grand encore, et l'on éprouverait de grandes difficultés à remettre ces pièces en batterie, si leur plates-formes n'étaient pas inclinées de l'arrière à l'avant.

Il peut arriver qu'une pièce montée sur son affût soit trop basse et qu'elle nécessite une embrâsure très-profonde, il faudrait alors relever la plate-forme; mais l'on obtient ce résultat avec d'autres avantages, en plaçant les affûts sur chassis.

Dans l'affût de côte de Gribeauval, le centre de rotation du

système se trouve en avant de la bouche à feu. Les Anglais font varier, suivant les circonstances, le centre de rotation de leurs affûts. Quelquefois ils le placent au milieu du système, cela permet de donner à la pièce une direction quelconque à l'horizon, et présente une disposition qui peut être avantageuse pour une pièce mise en batterie sur un point isolé, comme une tour; quelquefois même ils placent ce centre de rotation à la partie postérieure du système. On voit que, dans ce cas, si l'épaulement était limité, l'affût pourrait le quitter et se montrer entièrement à découvert; pour remédier à cet inconvénient, les Anglais ont placé leurs pièces derrière des épaulements circulaires ou à pans coupés. L'arc de cercle a dû être d'autant plus grand que le centre de rotation se trouve plus éloigné de la tête de l'affût.

Les chassis de ces affûts sont ordinairement en bois, mais ils ont été construits en fonte pour le service des colonies. Ils se composent alors de deux longues pièces en fonte, coulées en équerre dont la partie horizontale sert de voie aux roulettes de l'affût et dont la partie verticale sert à renforcer le métal contre la flexion. Des soutiens en console sont placés de distance en distance. La partie horizontale est terminée par une saillie élevée qui sert, sur toute la longueur, à maintenir la roulette. Les deux chassis sont reliés entre eux par des entretoises et leur écartement est empêché par des boulons d'assemblage, répartis sur toute la longueur. Chacune des extrémités de ces chassis porte une roulette disposée suivant la position du centre de rotation de l'affût.

Les affûts peuvent, comme on le voit, être modifiés à l'infini bien qu'ils soient tous répartis dans deux classes générales : ceux qui élèvent beaucoup la pièce au-dessus de la plate-forme, et ceux qui ne l'élèvent pas suffisamment et ont besoin d'un chassis; dans les affûts anglais, le chassis élève la pièce de la moitié de la hauteur totale au-dessus du sol.

Dans ces deux espèces d'affûts les efforts sur le sol sont très différents, et comme le chassis remplace le sol dans le cas des affûts qui en comportent un, plus ce chassis se trouve élevé plus l'effort qu'il doit supporter se trouve diminué. Aussi, à longueur égale, le derrière de l'affût de place et de côte supporte des efforts bien moindres que les affûts de siège placés sur une plate-forme au niveau du sol.

Dans les affûts de place et de côte, la masse de la roue étant répartie en grande partie sur sa circonférence et le rayon de cette roue étant petit, il en résulte que la roue glisse d'abord sans rouler ; ce n'est que peu à peu qu'elle prend un mouvement de rotation, en rapport avec la vîtesse de recul, de sorte qu'elle glisse d'abord et ne roule qu'après un certain recul ; mais dès que le frottement est vaincu, les roues, à cause de leur grand moment d'inertie, prolongent un peu le mouvement de recul. La disposition des roues sert donc à modérer le recul des affûts et à la rendre plus uniforme.

Les Suédois ont fait subir à l'affût de campagne à flèche et à petits flasques, une modification assez importante. Au lieu d'appliquer les flasques contre la flèche et de les assembler avec elle par des rondelles, ils ont transformé ces flasques en de petits supports appliqués au-dessus de la flèche elle-même. Il en résulte que la flèche doit être plus large que dans nos affûts, de toute la largeur des deux supports ; mais ce désavantage est compensé par la disposition de l'essieu, qui placé immédiatement au-dessus des encastrements des tourillons, se trouve enchassé à la partie supérieure de la flèche. La distance de l'axe de la pièce à l'axe de l'essieu, est moindre et l'effort sur les crosses se trouve considérablement diminué. Du reste les Suédois ont construit ces supports en fonte, cela a permis d'en réduire la largeur ainsi que celle de la flèche qui en dépend.

Roulage des voitures.

Quand un fardeau pose à terre, on peut le transporter d'un point à un autre, soit en l'enlevant, soit en le traînant ; dans ces deux cas l'effort à faire pour opérer le transport est bien différent. Il varie même beaucoup avec le mode de traction que l'on employe. L'expérience a fait voir qu'une caisse, ayant un poids de 245^k, et qui si on voulait la transporter en l'élevant, exigerait un effort continu de 245^k, n'exige plus dans le cas de la traction qu'un effort donné par le rapport de la pression au frottement et égal à 140^k sur une surface de route pavée. En posant la caisse sur des roulettes de $0^m,75$ de diamètre, l'effort n'a plus été que de 60^k; avec des roues de $1^m,00$ de diamètre, il n'a éte que de 45^k et de 30^k seulement avec des roues de $1^m,50$ de diamètre. Sur

des rouleaux de $0^m,27$ de circonférence ou $0^m,09$ de diamètre, on n'a plus eu besoin que d'un effort de 25^k. On voit donc que pour le facile transport des fardeaux, il faut employer des systèmes de roues ou de voitures, et que l'effort à exercer diminue à mesure que le diamètre des roues augmente. Nous verrons plus loin que cette seconde conclusion n'est vraie que dans de certaines limites.

Les voitures sont généralement composées d'un corps de voiture sur lequel est déposé le fardeau, et de roues qui tournent autour d'un essieu relié à la voiture. Anciennement les roues employées étaient très-petites et ne dépassaient guère $1^m,00$ de diamètre. Aujourd'hui on a adopté des dimensions plus grandes, le roulage a été amélioré et le tirage s'est trouvé diminué. Nous examinerons la question du roulage sous le rapport de la construction des roues et de l'effort à faire pour imprimer le mouvement aux voitures.

Nous pouvons supposer qu'il ne s'agit que d'une seule roue, parceque le poids étant réparti sur les deux roues appliquées aux fusées d'un essieu, dans une proportion connue, et ces deux roues étant égales, lorsque l'on connaîtra les résistances qu'éprouve l'une d'elle on en pourra conclure la résistance des deux à la fois.

Quand une voiture est au repos, l'essieu pose sur la boîte de roue par l'arête inférieure de la fusée : pour mettre la roue en mouvement, puisque l'essieu presse sur la boîte d'une partie du poids de la voiture, à laquelle il se trouve relié, il faut que le frottement exercé sur la boîte par l'arrête inférieure soit vaincu par l'effort destiné à produire le tirage. Supposons que le roulage s'effectue sur un plan horizontal, l'effort exercé pour imprimer le mouvement étant horizontal lui-même, il y a tendance à ce que la fusée d'essieu s'avance et s'élève sur la boîte de roue. La fusée d'essieu porte alors sur la boîte par une arête intermédiaire; celle-ci peut être considérée comme glissant sur un plan incliné qui serait tangent à la surface conique intérieure de la boîte de roue, suivant l'arête en contact avec la fusée.

Appelons α l'angle que fait la trace de ce plan tangent avec l'horizontale. Cette arête de contact part du point le plus bas de la boîte qu'elle occupe dans le repos de la voiture et monte ensuite jusqu'au point intermédiaire en arrière du plan sur lequel le poids et la force de traction se feraient équilibre.

Cherchons l'expression des forces nécessaires pour que cet équi-

libre ait lieu. (fig. 50) Soit P le poids dont l'arête de l'essieu est chargée, l'essieu compris; p le poids de la roue; x l'effort nécessaire pour imprimer le mouvement de traction. L'effort qui tend à faire monter l'arête est évidemment $x \cos \alpha$ et celui qui tend à la faire descendre est P sin α. Dans le cas de l'équilibre, nous aurons donc

$$x \cos \alpha = P \sin \alpha.$$

Si nous cherchons maintenant les moments de la résistance à vaincre et de l'effort à exercer, nous aurons pour celui du frottement de l'arête, en appelant r le rayon de la boîte et f le rapport du frottement à la pression sur un tourillon, la pression sur cette arête étant la somme des composantes de P et de x dirigées suivant le rayon de la boîte qui aboutit au point de contact de la trace du plan α;

$$(x \sin \alpha + P \cos \alpha) fr.$$

Pour établir que l'équilibre a lieu, nous devons égaler ce moment à celui de l'effort de traction qui est XR, puisque la résistance à vaincre pour effectuer le roulage a lieu à la partie inférieure de la roue au point où s'exerce le frottement sur le terrain.

Nous aurons donc

$$(x \sin \alpha + P \cos \alpha) fr = XR.$$

De ces deux équations, on déduit la valeur de X; on a d'abord

$$\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{P}{x},$$

ou

$$\frac{1 - \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} = \frac{P^2}{x^2}$$

d'où

$$\sin \alpha = \frac{X}{\sqrt{P^2 + x^2}}.$$

On a de même

$$\cos \alpha = \frac{P}{\sqrt{P^2 + x^2}}.$$

Reportant ces valeurs dans la 2e équation, il vient :

$$\left\{ \frac{P^2}{\sqrt{P^2 + x^2}} + \frac{X^2}{\sqrt{P^2 + x^2}} \right\} fr = xR.$$

d'où

et $$(P^2+x^2) f^2 r^2 = x^2 R^2,$$

$$x^2 = \frac{P^2 f^2 r^2}{R^2 - f^2 r^2},$$

d'où enfin

$$x = \frac{Pfr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}}.$$

C'est la valeur de la force qui produit le mouvement, et l'expression théorique du tirage sur un terrain horizontal en supposant l'effort lui-même horizontal.

D'un autre côté, la résultante des deux forces P et x est $\sqrt{P^2+x^2}$ et le frottement de la fusée sur la boîte est $f\sqrt{P^2+x^2}$. La pression sur le terrain est $P+p$ et si la roue glissait le frottement de la roue sur le sol serait $F(P+p)$; F étant le rapport du frottement de la roue sur le sol à la pression, c'est cet effort qu'il faut comparer à x. Or ces distances des points d'application des frottemens au centre de rotation étant r et R, l'équilibre n'aurait lieu qu'autant que l'on aurait

$$rf\sqrt{P^2+x^2} = FR(P+p).$$

Mais généralement on a

$$fr\sqrt{P^2+x^2} < FR(P+p).$$

Par suite, la roue tourne et il n'y pas de glissement sur le terrain; la résistance que celui-ci présente est précisément égale à la force nécessaire pour faire tourner la roue c'est-à-dire, égale à

$$fr\frac{\sqrt{P^2+x^2}}{R}.$$

C'est en cela que consiste l'avantage du roulement sur le glissement dans lequel tout le frottement sur le sol doit être vaincu.

L'expression précédente est précisément celle de la force qui occasionne le tirage et l'on a

$$x = fr\frac{\sqrt{P^2+x^2}}{R}$$

d'où

$$x^2 R^2 = f^2 r^2 (P^2+x^2)$$

et

$$x = \frac{frP}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}}$$

C'est la valeur de x que nous avons déjà trouvée plus haut. Ainsi tant que la roue tourne le tirage reste le même quoique F puisse varier, puisque la valeur de x en est indépendante; mais si F devient tellement petit que $fr\sqrt{P^2+x^2}$ soit égal ou plus grand que FR (P+p), la roue ne tournera plus et la voiture rentrera dans le cas des trainaux ou des corps qui glissent. Cette circonstance a lieu quelquefois sur la glace et quand les roues sont enrayées; dans ce cas on a x=F (P+p). Alors le tirage devient proportionnel au frottement de la roue sur le sol.

Plus le poids de la roue augmente, plus le frottement sur le sol est grand, et plus il y a des raisons pour que le système tourne. Il y a d'ailleurs pour le diamètre de la roue une certaine limite qui ne peut être dépassée sans que le poids de la roue ne devienne trop grand et ne nuise à la facilité du roulage.

Tout ce que nous venons de dire n'est rigoureux que dans le cas où l'on considère un plan horizontal et inflexible sur lequel s'exerce le roulement de roues inflexibles elles-mêmes; aussi le tirage théorique est-il inférieur à celui qui a lieu en réalité dans la pratique.

Dans l'expression théorique de la force nécessaire au tirage, nous avons négligé le frottement de deuxième espèce qui a lieu dans le mouvement de rotation de la roue sur le terrain, parce que ce frottement est très-petit, lorsque le sol et la roue sont parfaitement durs, comme on les suppose théoriquement. Il est encore fort petit dans la pratique, quand le sol et la roue sont doués d'une certaine raideur. En effet, Coulomb a trouvé que le double frottement de deuxième espèce qu'éprouvent des rouleaux d'orme, c'est-à-dire d'un bois peu dur, n'est que de 1/200 de la pression pour un diamètre de 12 pouces, et en raison inverse du diamètre pour des rouleaux d'une autre grosseur. Il résulte de là que pour les roues d'affût qui ont 54 po de diamètre, le double frottement ne serait que 12/54 × 1/200 = 1/900 de la pression; par suite, pour l'affût de 12 qui pèse 3150 ᵗᵗ avec le canon et ses roues, le frottement de deuxième espèce de la roue n'augmenterait le tirage que

de 3 " 1/2 ; il faut encore réduire cette augmentation parce que les roues n'éprouvent pas le double frottement des rouleaux et que le frottement supérieur éprouvé par les rouleaux qu'employait Coulomb est remplacé par le frottement *f* sur la boîte, frottement que nous avons reconnu inférieur à celui de la roue sur le sol. Il est donc certain que le frottement de deuxième espèce de la voiture d'artillerie de campagne la plus pesante ne va pas au-delà de 2 " pour l'arrière-train. Nous verrons plus loin comment on tient compte de l'enfoncement de la roue dans un terrain compressible, enfoncement qui met la roue dans le même cas que si elle avait à monter sur un plan incliné.

Edgeworth a trouvé que dans les voitures à deux chevaux, l'effort nécessaire pour effectuer le tirage était six fois plus grand que l'effort théorique, sur des surfaces planes et graissées. Cela tient à la compressibilité du sol et à la construction de la roue qui est flexible de sa nature.

Dans le roulage sur les chemins de fer, où la voie et les roues sont en fonte, le tirage effectif se rapproche beaucoup plus du tirage théorique, et en général sur les meilleures routes, le tirage est cinq fois plus grand que celui qu'il faut employer sur les chemins de fer. Du reste le tirage pratique varie beaucoup avec la forme et la nature des chaussées sur lesquelles il s'exerce ; en prenant pour unité le tirage sur un pavé bien construit, on trouve 1 2/3, pour celui sur la terre dure et les empierrements tassés ; 2 sur les routes graveleuses ; 3 2/3 pour celui sur les routes pierrées (les pierres ayant 18 lignes de diamètre) et enfin 4 1/3 sur les chemins sablonneux et sur les empierrements nouvellement construits.

Cette variation dans le tirage, suivant la nature de la route, provient ou des obstacles que la route présente à franchir à la voiture, ou des ornières qui se forment sous les roues; on peut diminuer ce dernier inconvénient en donnant aux roues des jantes plus larges ; le poids de la voiture se répartit alors sur une plus grande surface et les ornières sont moins profondes : de cette manière aussi les roues ne peuvent venir se loger dans les interstices des pavés. A la vérité, elles rencontrent plus facilement les aspérités à franchir, mais l'avantage des larges jantes n'est pas moins réel, comme le prouvent les expériences faites par Rumfort. Cet obser-

vateur a trouvé qu'en remplaçant une largeur de jante de 12po par une largeur de 7po on augmentait le tirage de 1/10 sur le pavé, de 1/12 sur la terre dure, de 1/7 sur les chemins sablonneux et de 1/13 sur les empierrements. Il est vrai qu'en augmentant la largeur des jantes on augmente le poids de la roue, mais cette augmentation est peu de chose relativement au poids du fardeau et de la voiture. Dans la pratique on ne donne guère plus de 7po à 8po de largeur aux jantes. Il existe cependant en Angleterre des voitures destinées à transporter des fardeaux considérables et dont les roues ont jusqu'à 15po de largeur de jante.

Examinons les conditions auxquelles doit satisfaire la construction des roues et des essieux ; il est d'un haut intérêt de les disposer tous deux de la manière la plus avantageuse au tirage. Dans les rouleaux, le bois ne peut guère se déprimer et il en est de même pour les roulettes construites d'un seul morceau. Mais dans les roues formées de plusieurs pièces, il peut s'opérer un aplatissement et une déformation de la roue, par suite du poids de la voiture et de la charge. Il semble au premier abord, qu'il serait avantageux de construire les roues d'une seule pièce. Mais il est des conditions essentielles qui nécessitent le rejet absolu de ce mode de construction ; aussi toutes les roues, mêmes les plus petites, comme celles des voitures nommées diables et camions sont construites comme les grandes roues de plusieurs pièces assemblées avec soin. Les roues éprouvent des chocs très-forts de la part du terrain et de l'essieu, parce qu'elles sont soulevées et retombent à chaque instant. Si elles étaient d'une seule pièce, ces chocs les déformeraient petit à petit et finiraient par les détériorer ; tandis que lorsque ces chocs sont répartis sur plusieurs pièces donées d'une certaine flexibilité ; leur effet destructeur se trouve considérablement amorti; les points pressés parcourent un certain chemin avant d'atténuer la vitesse du corps choquant et la pression est ainsi moindre à chaque instant que si le chemin parcouru était aussi faible qu'il l'est dans le choc contre un corps peu élastique. Dans les roulettes d'une seule pièce, le diamètre intérieur de la boite augmente rapidement par suite des mêmes chocs, elle se déforme et la roulette bientôt ne tourne plus régulièrement.

Les roues sont composées de trois parties distinctes, le moyeu, la couronne, composée de jantes, et les rais. Ceux-ci sont assem-

blés avec les jantes et le moyeu et dans ces deux assemblages ainsi disposés, l'élasticité du système est plus grande que celle d'un plateau qui aurait le même diamètre. Les rais forment une surface conique et cette disposition offre deux avantages ; d'abord elle augmente la résistance latérale de la roue contre les obstacles et contre les ornières qui la pressent du dehors en dedans : en effet, tous les rais étant reliés par la couronne que forment les jantes , se trouvent solidaires les uns des autres et augmentent la résistance de la roue; ils se comportent comme autant de ressorts sur lesquels se répartit l'effort qui presse en un point quelconque des jantes ; l'un d'eux ne peut bouger sans que tous les autres lui prêtent leur assistance, et par suite tous font effort à la fois pour résister à la déformation de la roue ; autrement, si tous les rais étaient dans le même plan, plusieurs d'entre eux pourraient être forcés sans que les autres s'y opposassent et la roue pourrait être brisée suivant l'un de ses diamêtres; il n'y aurait que la force du bois en travers de deux portions de la jante pour s'opposer à cette rupture.

Cette disposition des rais inclinés est surtout favorable pour s'opposer à la dislocation, parce que le rais est pressé dans le moyeu toujours par la même surface un rais vertical le ser ait tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, et cette circonstance est la plus défavorable à la conservation des assemblages et pour s'opposer à ce que la roue fit chapelet.

La disposition inclinée des rais augmente aussi la résistance de la roue aux pressio ns latérales, qui ont lieu contre les jantes de la part des obstacles que le chemin présente, et il se passe là un fait analogue à celui qu'offre une feuille de papier qui, déployée, n'est douée d'aucune résistance, mais qui, une fois roulée en cône, en présente une incomparablement plus grande. En second lieu, cette forme rend le système plus flexible, et par suite augmente sa résistance contre les chocs de l'essieu ; cette flexibilité modère donc l'action des chocs brusques, mais aussi elle augmente un peu l'effort que nécessite le tirage. Nous avons vu , en effet, que les roues inflexibles facilitent le tirage ; mais comme des roues inflexibles ne pourraient offrir aucune durée , il a fallu leur donner une certaine élasticité qui fut capable seulement d'en diminuer les chances de destruction qui proviendraient des chocs de l'essieu.

Plus une roue doit rouler rapidement, plus sont forts les chocs qu'elle éprouve à la rencontre des obstacles qu'elle doit franchir et plus doit être grande l'élasticité dont elle est pourvue; c'est ce que l'on a soin de faire pour les voitures de postes.

On a construit des roues où les rais étaient inclinés dans les deux sens, extérieurement et intérieurement ; il résultait de cette disposition que les roues n'avaient aucune élasticité ; elles pourraient être avantageuses dans le cas où il s'agirait de traîner lentement de grands fardeaux sur des routes bien planes ; aussi s'est on servi avec avantage des roues de cette espèce pour le transport des chevaux du sculpteur Coustoux, de Marly à la place de la révolution. Mais pour les voitures du commerce qui doivent marcher avec une certaine rapidité, les efforts latéraux tendent évidemment à arracher les rais à droite et à gauche suivant que la pression s'exerce à gauche ou à droite ; il résulterait de là une prompte dislocation du système ; aussi a-t-on renoncé à ce système.

Il existe d'autres roues qui ont quelqu'analogie avec celles dont nous venons de parler. Ce sont les roues où les rais sont bien tous inclinés du même côté, mais alternativement, sous deux angles différents ; elles ont un peu plus d'élasticité que les précédentes, mais pourtant se disloquent à-peu-près aussi facilement. Les Anglais avaient adopté ce mode de construction pour les roues de leur matériel de campagne, cependant après la guerre d'Espagne de 1812 où ils ont été à même d'en reconnaître souvent les inconvénients ils y ont complètement renoncé.

L'axe de la fusée étant légèrement incliné, les rais sont un peu redressés quand ils portent sur le sol. Il résulte aussi de là que quand la voiture se trouve sur un plan déversé, le fardeau repose sur la roue la plus basse, dont les rais deviennent à peu-près verticaux ; ceux-ci résistent alors dans le sens de leur plus grande force ; comme dans ce cas l'élasticité se trouve annulée, il peut arriver que la roue fasse chapelet ; mais cela arriverait bien plus facilement si alors les rais ayant dépassé la position verticale se dirigeaient du dehors en dedans; il est facile de voir que plus le fardeau se trouve élevé au-dessus de l'axe de l'essieu, plus l'effort sur la roue la plus basse est considérable. Dans le cas d'un plan déversé, si le fardeau était appliqué au-dessous de l'essieu

les roues devraient être alors disposées en sens inverse, c'est-à-dire, offrir à l'extérieur le sommet du cône formé par les rais.

La flexibilité des roues présentant un désavantage dans le tirage, on a cherché à l'évaluer et on a trouvé qu'en prenant pour unité le tirage au petit pas, sur un chemin pavé ou pierré, il était 1 1/3 au grand pas, 2 au petit trot, et 3 au grand trot. Cela provient de ce que dans les chocs, l'aplatissement des roues, dû à leur élasticité, est d'autant plus grand que les chocs sont plus considérables par suite du mouvement plus rapide. Du reste, les résultats précédents obtenus avec les roues très-flexibles qu'on a soumises à l'expérience ne se reproduiraient pas avec les roues ordinaires.

On appelle écuanteur l'inclinaison des rais sur le plan extérieur des jantes; dans l'artillerie, on appelle plus particulièrement écuanteur la distance à ce même plan de la partie des rais à leur point d'insertion dans le moyeu.

Dans le système de Gribeauval, l'écuanteur avait 6Po. 6lig. dans toutes les roues, de sorte que l'inclinaison des rais et par suite l'élasticité était beaucoup plus grande, pour les petites roues que pour les grandes. Dans le nouveau matériel, l'écuanteur est de 0m,080 avant et de 0m,090 après le ferrage des roues.

L'écuanteur a l'inconvénient d'écarter le plan des jantes du point d'appui des roues sur l'essieu, de faire porter les rais à faux et de les fatiguer ainsi que leurs mortaises, dans le cas le plus ordinaire, celui où l'essieu est horizontal.

Les roues sont ferrées de deux manières, avec des bandes ou avec des cercles; le ferrage avec des cercles a l'avantage de conserver l'élasticité de la roue, en augmentant sa solidité, et d'offrir un système moins facilement dislocable; c'est ce mode qui est adopté pour toutes les roues du nouveau matériel de campagne. Dans le matériel de Gribeauval, le ferrage des roues se pratiquait à l'aide de bandes ajustées bout à bout et dont les points de jonction correspondaient au milieu des jantes; les clous employés pour assujétir ces bandes tendait, par leur forme, à les rapprocher le plus possible, pendant l'opération; mais la dessication du bois finissait toujours par causer un certain jeu entre les pièces adjacentes.

Le moyeu est toujours construit d'une seule pièce, resserrée par des corçons et par des frettes, afin d'empêcher l'écartement des fibres et l'élargissement des fentes ou fissures longitudinales, qui

s'y manifestent constamment par la dessication du bois. Les rais ayant leurs fibres dans le sens des rayons de la roue, la dessication ne les raccourcit pas sensiblement; il n'en serait pas de même pour les bois non-fibreux, comme le noyer, par exemple, qui change de dimension dans tous les sens. Les rais, qui sont presque toujours construits en chêne, conservent une longueur invariable. Les jantes ayant leurs fibres dans le centre de la circonférence, restent bien invariables dans leur plus grande longueur, mais elles perdent de leur épaisseur, par la dessication. Les rais demeurant constants, et le moyeu ainsi que les jantes diminuant d'épaisseur, il en résulte que les rais tendent à se désassembler par la dessication de la jante et du moyeu.

Il résulte de la même cause un effet semblable à l'extrémité inférieure des jantes; si nous concevons un polygone inscrit au cercle formé par l'extérieur des jantes, les sommets de ce polygone restent les mêmes, mais les points intérieurs se rapprochent du côté extérieur, chaque jante contracte une forme plus aplatie et la surface extérieure de la jante n'est plus circulaire; il en est de même pour la jante voisine; les jantes adjacentes n'étant plus en contact, il s'établit entre elles ce que l'on nomme un déjour. (fig. 51) Les jantes ne portent plus alors les unes sur les autres que par un seul point et il en résulte que le système peut être très-facilement rompu ou disloqué. Plus le bois que l'on emploie prend de retrait, plus le déjour est considérable; avec le ferrage par bande, on peut remédier jusqu'à un certain point à ce grave inconvénient; l'on a soin pour cela de tailler les bois de manière que les jantes au lieu d'être jointives, laissent entre elles un déjour extérieur, afin que le dessèchement des bois ait pour principal effet de faire disparaître ce déjour extérieur. En effet, le déjour intérieur se produisant, il en résulte alors une séparation complète des jantes adjacentes à laquelle on remédie de la manière suivante. Les clous qui servent à assujétir les bandes aux jantes ont la tête formée par une pyramide quadrangulaire, et en ferrant les roues ou appuie la tête de ces clous contre la face qui est du côté de l'extrémité de la bande, sans toutefois les enfoncer jusqu'au bout. Les roues sont alors emmagasinées; lorsque l'effet de la dessication a eu lieu, les roues, dont les jantes se trouvent disjointes, sont mises en usage, le propre poids des voitures achève dans le roulage de

pousser les clous, la mise en place de ceux-ci resserre alors suffisamment les jantes les unes contre les autres. C'est pour que le rapprochement des bandes puisse avoir lieu qu'on laisse toujours dans le ferrage une petite distance entre deux bandes consécutives; on évite ainsi que les bandes arcboutent les unes contre les autres; cet intervalle n'a pas besoin d'être plus grand que celui dont les jantes doivent se rapprocher.

Quand les roues sont ferrées avec des cercles, on n'a plus le même moyen de resserrer les jantes : il faut donc employer du bois plus sec et il est inutile alors de pratiquer un déjour à l'avance; quand les jantes se sont disjointes, il faut ôter le cercle de la roue, le couper, le resouder, puis recercler la roue. Le cercle procurant plus d'élasticité, comme nous l'avons déjà dit, convient aux roues du matériel de campagne et peut même s'employer pour les roues des affûts de siége, qui cependant ont des bandes (*); les cercles sont bons en général, pour les roues de toutes les voitures qui doivent marcher avec rapidité.

Quand on connaît le retrait du bois on peut calculer le déjour à donner aux jantes de manière que celles-ci joignent sur leur surface entière quand ce bois sera parfaitement sec. En effet, soit *fhie* et *iegj* les faces des jantes dans cet état *al* étant descendu en *eg* et *bk* en *ef*, *ae* est parallèle à *cm* et *be* à *cn*, de sorte que l'angle *aeb* est égal à l'ange *mcn* du polygone régulier *feg* etc. dont le nombre de côté est égal à celui des jantes qui forment la couronne. Les triangles *aeb*, et *gce* étant semblables, on a le déjour *ab* est à *eg*, comme *ae*, quantité dont se réduit *ai*, hauteur de l'extrémité de la jante perpendiculairement aux fibres est à *ce* rayon du cercle circonscrit. Puisque *a* est très voisin de *d*, on a de même $a'i : cm :: di : ce$; de ces deux proportions on tire $ab : ae :: eg : \frac{ce^2}{cm}$; ou bien le déjour est la quantité dont la hauteur des jantes se réduit par la dessication, comme le côté du polygone est au carré du rayon du cercle circonscrit, divisé par le rayon du cercle inscrit. (fig.52) Dans les roues de campagne de Gribeauval, auxquelles on donnait deux lignes de déjour, les jantes joignaient lorsqu'elles s'étaient réduites de $2^{li}, 4^{pt}$ pour les grandes roues de 6 jantes et de $2^{li}, 1^{pt}$ pour celles d'avant-train de 5 jantes,

(*) Elles sont actuellement cerclées comme les autres roues.

ce qui suppose pour le bois donné un retrait de 1/20. Le déjour a l'inconvénient de permettre aux roues de se déformer plus facilement ; aussi en général, les roues cerclées sont préférables, elles fatiguent moins les assemblages, roulent mieux et durent plus longtemps. Mais quand on est forcé de construire des roues avec du bois qui n'est pas très-sec, il est préférable d'employer les bandes dans le ferrage, afin de n'avoir pas à recouper les cercles trop fréquemment.

L'expression de l'effort nécessaire au tirage, fait voir qu'il y a de l'avantage à donner à la boîte de roue le rayon le plus petit possible. Pour atteindre ce but, on diminue le diamètre des essieux dans les parties où ceux-ci s'engagent dans les roues, et que l'on nomme les fusées.

Comme les essieux sont dans le cas d'une barre appuyée par deux points voisins de ses extrémités et soumise à une pression intermédiaire, il est nécessaire, pour avoir une plus grande résistance avec la même quantité de matière, de donner plus de résistance au corps d'essieu qu'aux fusées et à celles-ci une épaisseur plus grande à l'épaulement qu'aux bouts, c'est-à-dire, de leur donner une forme conique. Cette forme permet d'adopter pour le rayon moyen de la boîte une dimension plus faible et par suite de faciliter le tirage.

Comme il est important que l'essieu appuie sur la boîte de roue suivant une grande partie de sa longueur et non par des points isolés, il a fallu combiner cette nouvelle condition à remplir avec la forme conique à conserver aux fusées ; par suite on a dû incliner leur axe, en maintenant horizontale la partie inférieure suivant laquelle la voiture porte sur la roue. Si l'axe de la fusée était la continuation de l'axe du corps d'essieu, la roue tendrait toujours à glisser le long de la surface conique de cette fusée, et elle viendrait par conséquent appuyer contre la rondelle qui n'est assujétie que par l'esse du bout d'essieu. Il résulterait de là un frottement assez fort pour augmenter notablement le tirage. Dans les essieux de Gribeauval, on a adopté le mode de construction précédent ; l'arête inférieure des fusées est le prolongement de l'arête inférieure du corps d'essieu et l'axe de la fusée est incliné par rapport à celui du corps d'essieu. Dans les essieux en fer du nouveau modèle l'arête inférieure est inclinée de façon qu'au petit

bout cette arête est plus abaissée que près de l'épaulement. C'est l'épreuve qu'on fait subir aux essieux, en les soumettant au choc d'un mouton, qui incline cette arête ; cette quantité est de 5^{mm} mesurée aux trous d'esse.

La forme conique des fusées a encore l'avantage de faciliter la manœuvre du changement de roue. Si cette partie était cylindrique, elle serait beaucoup plus difficile à engager dans la boîte de roue ; surtout quand les canonniers sont fatigués par le fardeau qu'ils ont à soutenir, soit en élevant l'essieu, soit en amenant la roue. De plus la graisse dont on a soin d'enduire la partie supérieure des fusées des essieux n'est pas entrainée quand on remet la roue.

La boîte de roue a une cavité dans une partie de sa longueur, et la graisse ne peut s'échapper en glissant, à cause du vide où elle se loge dans le tirage ; de cette manière les surfaces métalliques en contact sont rendues suffisamment onctueuses pour qu'elles ne soient pas promptement usées.

Dans les essieux nouveaux que l'on a cherché à alléger autant que possible, on a donné la forme amincie, non seulement aux fusées, mais encore on a construit en pyramide une partie du corps d'essieu. On a adopté deux essieux différents, l'un pour tous les affûts, l'autre pour les arrière-trains des autres voitures de campagne et pour tous les avant-trains. La première condition à remplir était de leur donner une résistance assez grande pour qu'ils ne puissent être faussés, sans toutefois augmenter leur poids outre mesure. On a construit ces essieux de manière qu'ils fussent doués de la même résistance sur toute l'étendue du corps, et comme les calculs des résistances des matériaux ne sont pas suffisamment rigoureux et nécessitent toujours dans leurs applications, l'introduction de coëfficients déterminés à l'avance par des hypothèses particulières, on a pris le parti de s'occuper d'expériences directes pour déterminer la forme la plus avantageuse à donner aux essieux. On s'est appuyé pour cela sur un principe résultant des expériences faites sur les bois à Corfou, par monsieur Charles Dupin, et en vertu duquel lorsqu'un corps flexible est soumis à l'action de poids qui ne peuvent le briser, les rayons de courbure de la flexion obtenue sont en raison inverse des poids qui l'ont déterminée.

On a appliqué ce principe aux essieux, et l'on a calculé les courbures à leur donner pour les rendre capables de résister également en chaque point, à la pression maximum qu'ils peuvent y supporter. Comme dans les essieux les points d'application ne restent pas constants, on n'a pas dû agir comme si les pressions qui tendent à les fléchir étaient constamment appliquées au milieu du corps d'essieu. Connaissant ces pressions on a pu calculer les flexions et par suite déterminer les courbures à donner aux essieux. On a trouvé, en tenant compte des pressions à l'endroit des deux flasques, deux inflexions symétriques dans le tracé de l'essieu ; mais en ne considérant qu'une seule de ces pressions on ne trouve aussi qu'une seule inflexion. Les courbes étant ainsi trouvées on y a substitué, dans le tracé des essieux, les lignes tangentes qui les enveloppent.

Dans les essieux du nouveau matériel, toute la partie comprise entre les deux flasques est un parallèlipipède ; mais à partir de ces points, les corps d'essieux sont terminés par des pyramides quadrangulaires auxquelles se rattachent les fusées coniques ; de la sorte, on est parvenu à donner aux essieux toute la résistance nécessaire, sans trop augmenter leur poids. Les lignes droites qui en terminent les profils ont dû être tracées un peu au-dessus des tangentes réelles, pour obtenir plus de régularité dans les formes.

L'essieu étant construit, on a cherché à augmenter l'indépendance des mouvements latéraux des roues ; dans le cas le plus défavorable qui puisse se présenter, celui où l'essieu se trouve constamment chargé en son milieu, il se produit une flexion successive que les secousses verticales, souvent répétées, finissent par rendre sensible, en relevant le bout des essieux. Il est donc convenable de remédier à cet inconvénient ; l'on y parvient, en abaissant les arêtes inférieures des fusées de quelques millimètres au-dessous de la position horizontale que les secousses accidentelles tendent alors à leur faire regagner. De cette manière, les roues quelque chargées qu'elles soient, se meuvent facilement de droite à gauche, et réciproquement. Cette allée et venue facile des roues, leur permet de franchir aisément, en s'en éloignant un peu, les obstacles que les routes présentent, et par suite cette disposition diminue le tirage. On peut remarquer que dans les voitures qui

roulent le mieux, on entend un petit battement qui résulte des légers chocs alternatifs des roues contre l'épaulement de l'essieu et contre la rondelle du bout; et l'essieu se balançant ainsi, en glissant sur les deux boîtes, les chocs sont beaucoup atténués.

Dans le roulage, ce n'est pas l'arête inférieure de la fusée d'essieu qui frotte contre la boîte de roue; on a vu que l'arête frottante s'élevait sans que jamais le rayon qui y aboutissait put arriver à faire un angle très-grand avec la verticale. Ainsi, lors même que l'on rendrait horizontale l'arête inférieure de la fusée, l'arête frottante ne le serait pas, ce serait la partie frottante de la fusée qu'il faudrait rendre horizontale à l'avance par la construction de l'essieu; il faudrait de plus que cette arêtefut perpendiculaire au plan suivant lequel s'opère la traction; l'on a cherché le plus possible à satisfaire à ces conditions.

En Angleterre, on a construit des essieux dont les arêtes antérieures des fusées étaient en ligne droite; il arrivait par suite de cette construction que les deux roues convergeaient vers le devant de la voiture, sans que la véritable arête frottante fut horizontale. Il résultait de là, que quand les roues s'engageaient dans des ornières, elles tendaient à se tordre l'avant en-dehors et l'arrière en-dedans; aussi a-t-on promptement abandonné ce système vicieux. Il en résultait encore cet autre inconvénient grave, que le poids de la voiture tendant à rapprocher les roues des bouts d'essieu, il y avait un frottement plus considérable sur la rondelle, ce qui augmentait le tirage.

Edgeworth s'étant occupé d'expériences sur la construction la plus favorable des essieux, a reconnu que sur une plate-forme horizontale en madriers, le tirage avec essieu à arête inférieure rectiligne, était au tirage avec un essieu à arête antérieure rectiligne, comme 14 1/2 est à 26 ou : : 5 : 9. Il est évident, d'après ce que nous avons dit, relativement à la manière oblique dont les roues placées sur un essieu semblable s'engagent dans les ornières, que le frottement latéral eut encore augmenté considérablement le désavantage de cet essieu si Edgeworth l'eut éprouvé sur un terrain moins résistant.

On a beaucoup prôné un nouveau mode d'essieu proposé par plusieurs constructeurs de voitures, ce sont des essieux tournants, soit d'une seule pièce, soit à deux fusées indépendantes.

Les roues, dans ce système, sont reliées invariablement à l'essieu. Les chocs n'étant pas amortis par le mouvement de la roue sur l'essieu, le système est peu solide et par suite inadmissible dans le service de l'artillerie. Pour que l'essieu puisse tourner facilement, il faut qu'il soit horizontal, que les roues soient verticales et que l'essieu ait deux parties arrondies tournant dans des boîtes qui l'assujétissent au corps de voiture. De la verticalité des roues, résulte absence d'élasticité. De plus, quand une voiture tourne, la roue extérieure fait beaucoup plus de chemin que la roue intérieure, et elle est forcée de glisser en exerçant un frottement considérable. On a cherché à remédier à ce défaut en construisant des essieux tournants de telle sorte que chaque roue, indépendamment du mouvement imprimé par l'essieu pût tourner autour de celui-ci, comme autour d'un essieu ordinaire. Un pareil système était très-compliqué; outre cela, le tirage était augmenté, car les cylindres qui tournent dans les boîtes se trouvaient dans le même cas que les fusées; et comme leurs diamètres étaient plus grands que ceux des bouts de fusées, puisqu'ils étaient plus rapprochés du milieu de l'essieu, il en résulte que le diamètre des surfaces frottantes était plus considérable, que le frottement était plus grand et que le tirage était augmenté.

La seconde espèce d'essieu tournant était composée de deux fusées indépendantes, portant chacune leur roue; elles tournaient dans un collet, par une partie cylindrique et portaient à leur extrémité un pivot engagé dans une crapaudine qui servait de second point d'appui; cela faisait deux points frottans au lieu d'un. Les roues étaient bien ainsi indépendantes l'une de l'autre, mais le système était encore plus compliqué que le précédent. La surface cylindrique frottante avait nécessairement un plus grand diamètre que celui de la fusée; par suite déjà le frottement était plus considérable que pour l'essieu ordinaire; et comme il fallait y ajouter encore le frottement du pivot dans sa crapaudine, il résultait de ces deux forces inverses une force résultante appliquée, dans le sens de la plus grande, au point de rotation de la partie cylindrique; cette combinaison augmentait le frottement et par suite le tirage.

La considération de ces divers frottements devait suffire pour faire rejeter ce système d'essieu du service de l'artillerie, quelle que fût la faveur dont il jouissait. Mais Rumfort s'est occupé d'ex-

périences sur les essieux et il a obtenu des résultats qui ne laissent aucun doute sur les avantages des essieux ordinaires. Cet observateur a employé une voiture du poids de 1488k à laquelle il a adapté successivement quatre espèces d'essieux. Voici le tableau des résultats qu'il a obtenus :

Nature des essieux.	Ordinaire en bois.	Tournant double.	Tournant simple.	Ordinaire en fer (horiz. par dessous.)
Valeur du tirage sur Une route horizontale pavée	190k	219k	180k	150k
Une route pavée légérement inclinée	200	245	195	155
Une route très-inclinée en terre	325	332	300	295

On voit d'après ce tableau que l'essieu ordinaire en fer a eu constamment l'avantage; il est donc préférable à tous les autres, lorsque les fusées sont convenablement tracées.

Il arrive souvent à la guerre, qu'on ne peut graisser les roues, soit par faute de temps, soit par faute de moyens. Il résulte nécessairement de là un plus grand frottement des essieux dans les boîtes et une usure plus prompte. Il n'en faut pas moins que les voitures marchent; il est d'un haut intérêt de rechercher laquelle des boîtes en bronze ou en fonte peu offrir le plus d'avantage en pareil cas. Cette comparaison est d'autant plus nécessaire que les boîtes en fonte étant beaucoup plus économiques, semblent devoir mériter la préférence. On a soumis à l'expérience des boîtes des deux métaux et on a reconnu que tant que les roues ont été graissées le tirage a été sensiblement le même ; mais dès que la graisse a été enlevée, le frottement de l'essieu en fer contre la boîte de fonte l'a rapidement détériorée en augmentant son diamètre, tandis que la boîte en bronze a très-peu souffert. Il y a donc avantage à adopter cette dernière malgré la différence de prix.

Comme les anciens essieux en bois de l'artillerie, que l'on a abandonnés avec raison, étaient néanmoins prônés par plusieurs auteurs d'ouvrages publiés pour en réclamer une nouvelle adoption, on a dû les soumettre à des expériences comparatives avec des essieux en fer et voici les résultats qu'on a obtenus.

		EFFORTS NÉCESSAIRES AU TIRAGE.	
		avec graisse,	sans graisse.
Tirage horizontal	Essieux en bois	65k	108k
	Essieux en fer	56 1/2	61 2/3
Tirage sur un plan incliné de 3po par toise =1/24	Essieux en bois	96 2/3	162 5/10
	Essieux en fer	95	100

On voit quelle énorme différence se présente dans les efforts nécessaires au tirage horizontal ou incliné à 1/21, lorsqu'on supprime la graisse pour les essieux en bois et pour les essieux en fer. Cette différence a encore été plus sensible quand on a opéré sur un plan incliné de 6po par toise. Dans ce cas, l'effort n'a été augmenté que de 10 k. sur 200 pour l'essieu en fer, mais il a été doublé pour l'essieu en bois. On voit par là que les essieux en bois ne peuvent être employés raisonnablement que dans le cas des voitures extrêmement légères et dont on tient par-dessus tout à ne pas augmenter le poids.

Il est encore une question importante à examiner : c'est celle de la longueur à donner aux parties frottantes, c'est-à-dire aux moyeux et aux fusées.

A l'époque de l'établissement du système Gribeauval, on admettait que le frottement diminuait lorsqu'on augmentait l'étendue des surfaces frottantes; on pensait en conséquence qu'une grande longueur de moyeu diminuait le tirage; les expériences de Coulomb ont montré que le frottement était indépendant de la surface frottante.

Cependant l'avantage d'un long moyeu, qui est nul tant que l'essieu est horizontal, se fait sentir quand cet essieu est suffisamment incliné. En effet, G étant le centre de gravité du système, si la pesanteur au lieu d'agir suivant G g perpendiculairement à l'essieu agit suivant une ligne oblique G g', la résistance du sol au lieu de s'exercer suivant la perpendiculaire R r à l'essieu, agira suivant la perpendiculaire Rr' : il en sera de même pour l'autre roue; si la direction Rr' de la résistance passe par un point du moyeu, la pression de la boîte sur l'essieu produira le même frottement en le supposant cylindrique; mais si l'essieu n'est plus horizontal et si la direction G g'' de la pesanteur est suffisamment inclinée sur celui-ci, la direction R r'' de la résistance passera en dehors de la boîte ; alors la pression au lieu de se répartir sur l'arête inférieure seulement, s'exercera en deux points, en M au gros bout du moyeu inférieurement, et en m au petit bout, vers la partie supérieure; la résistance au petit bout m agissant dans le même sens que la pesanteur, la résistance en M, au gros bout, sera opposée à toutes deux et sera égale à leur somme et par conséquent elle sera plus grande que celle qui résulterait du poids

seul. La différence sera d'autant plus grande que l'essieu sera plus incliné. Les mêmes effets se produiront relativement au petit bout quand l'essieu sera incliné dans l'autre sens. Il y a donc sous ce rapport avantage à allonger le moyeu, mais il est superflu de l'allonger jusqu'à la ligne qui joint le centre de gravité G et le bord de la jante R, parce que quand cette ligne dépasse la verticale la voiture se renverse. (fig. 53).

Pour remplir complètement cette condition il faudrait un moyeu très-long avec lequel on risquerait de ne pouvoir passer dans des chemins étroits. Mais comme on évite nécessairement de placer les voitures dans des positions qui se rapprochent de celle qui produirait le renversement, on peut sans inconvénient tenir la longueur du moyeu au-dessous de cette limite.

Sur les terrains déversés le frottement augmente beaucoup, et plus le moyeu est court plus il y a de circonstances où la décomposition dont on a parlé arrive. Les longs moyeux n'ont donc quelqu'avantage que dans les terrains déversés; on pourra par conséquent diminuer la longueur des moyeux ; mais sans pourtant dépasser certaines limites. Dans les grandes roues de Gribeauval les moyeux ont 18 po de longueur et 15 po dans les petites roues d'avant-train. Ces dernières longueurs ont encore paru trop considérables et l'on a cherché dans le nouveau matériel à les diminuer, pour rendre plus facile le passage des voitures dans les défilés, et éviter ainsi des encombrements qui peuvent avoir quelquefois les conséquences les plus désastreuses.

En diminuant la longueur des moyeux du nouveau matériel, on n'a pas pu naturellement prévoir tous les cas qui peuvent se présenter sur les champs de bataille où l'on peut tout tenter, et où les obstacles arrêtent peu quels qu'ils soient, et l'on a dû considérer seulement les circonstances qui se présentent dans la marche des voitures sur les routes ordinaires. Comme elles n'y sont généralement que très-peu inclinées latéralement et moins encore qu'autrefois, les moyeux ont pu être réduits. On a déterminé leurs longueurs en prenant une moyenne entre les longueurs qui se rapportent à la position de la voiture lorsqu'elles verse et la position horizontale.

La position du plan des jantes relativement aux bouts du moyeu a aussi une influence sur les dimensions à donner à cette partie, et

son rapprochement du côté du petit bout, par suite de l'écuanteur, permet d'en diminuer la longueur. Considérons en effet, les deux roues à la fois: tant que la direction de la pesanteur et de l'essieu sera telle que la direction de la résistance R r' et S s' exercée au bas de la roue, ne passera pas hors de la boite, le frottement restera indépendant de l'inclinaison, dans l'hypothèse de l'essieu cylindrique. Mais pour une inclinaison plus considérable, la direction S s''' de la résistance du côté de la roue la plus élevée passera en dehors du petit bout et donnera lieu, d'un côté, à des pressions plus considérables; mais dans cette position la verticale G g'' du centre de gravité passant plus près de la jante la plus basse, la plus élevée supportera une moins grande partie du poids de la voiture ; l'accroissement de frottement qui a lieu de ce côté devient donc moins important ; et ainsi, l'inconvénient d'un moyeu court se trouve beaucoup diminué quand le plan de la jante est plus près du petit bout que du gros bout.

Telles sont les considérations qui ont déterminé les dimensions que l'on a adoptées pour les roues et les essieux du nouveau matériel, et qui se trouvent ainsi combinées de manière à donner les meilleurs résultats possibles. Tout ce que nous venons de voir n'a lieu que dans le cas où les voitures sont sensées marcher sur des terrains accidentés, et nous avons vu que s'il s'agit du roulage sur des chemins de fer, par exemple, il y a telle disposition qui devient avantageuse, tandis qu'elle offre de graves inconvénients dans le cas des routes ordinaires. Telle est l'inflexibilité des roues qui, dans le cas d'un chemin de fer, peut favoriser le tirage, tandis qu'elle l'entrave sur les routes ordinaires.

Après avoir examiné l'effort du tirage d'une voiture dans le cas où sa direction est horizontale, considérons le cas où le plan sur lequel s'effectue le roulage est horizontal, tandis que la ligne de traction fait un angle φ avec ce plan ; dans ce cas, la force de traction se décompose en deux forces, l'une horizontale, qui tend à faire avancer la voiture dans le sens du tirage et l'autre verticale qui tend à diminuer la pression P exercée par la voiture sur les boites de roues. x étant toujours l'expression du tirage, P se trouve diminué de $x \sin \varphi$; la force horizontale est alors $x \cos \varphi$. (fig. 51). Appelons T le rapport du tirage de cette force x' au poids

P' dont l'essieu est chargé; comme nous avons dans le cas où la traction est horizontale

$$x' = \frac{P' fr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}},$$

et

$$T = \frac{x'}{P'} = \frac{fr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}}$$

Dans le cas qui nous occupe nous aurons

$$T = \frac{x \cos \varphi}{P - x \sin \varphi},$$

reportant cette valeur de T dans la relation $T = \frac{fr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}}$ nous aurons,

$$\frac{x \cos \varphi}{P - x \sin \varphi} = \frac{fr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}},$$

de là on tire

$$x \cdot \cos \varphi . \sqrt{R^2 - f^2 r^2} + xfr \sin \varphi = Pfr$$

d'où

$$x = \frac{Pfr}{\cos \varphi \sqrt{R^2 - f^2 r^2} + fr \sin \varphi}$$

Telle est l'expression du tirage théorique quand la force de traction n'agit plus parallèlement au sol sur lequel les roues se meuvent.

On peut arriver également à cette valeur par la deuxième méthode que nous avons déjà suivie pour le tirage horizontal, c'est-à-dire en cherchant le moment de la pression de l'essieu sur la boîte et en l'égalant au moment de l'effort nécessaire pour faire tourner la roue le frottement sur la boîte est :

$$f\sqrt{(P - x \sin \varphi)^2 + x^2 \cos^2 \varphi} = f\sqrt{P^2 + x^2 - 2 Px \sin \varphi}$$

et agit à la distance r du centre de rotation ; la résistance du sol, ou le tirage horizontal qui le surmonte, est égal à $x \cos \varphi$ et agit à la distance R du centre de rotation nous avons donc

$$R x \cos \varphi = fr\sqrt{P^2 + x^2 - 2 Px \sin \varphi}.$$

Elevant les deux nombres au carré nous avons

$$R^2 x^2 \cos^2 \varphi = f^2 r^2 P^2 + f^2 r^2 x^2 - 2 f^2 r^2 Px \sin \varphi,$$

ou bien

$$x^2\{R^2 \cos^2\varphi - f^2 r^2\} + 2 f^2 r^2 P \sin\varphi\, x = f^2 r^2 P^2.$$

En résolvant cette équation du second degré on arrive à une valeur de x qui est la même que celle que nous avons trouvée plus haut.

On peut trouver l'angle de traction qui nécessiterait l'effort minimum ; il faut pour cela différencier la valeur de x par rapport à φ et égaler la différentielle trouvée à zéro. Or, comme on a

$$x = \frac{P fr}{\cos\varphi \sqrt{R^2 - f^2 r^2} + fr \sin\varphi}.$$

Le tirage sera un minimum pour la valeur de φ donnée par l'expression.

$$\frac{d\,(\cos\varphi \sqrt{R^2 - f^2 r^2} + fr \sin\varphi)}{d\varphi} = o.$$

Effectuant cette différenciation il vient

$$-\sin\varphi \sqrt{R^2 - f^2 r^2} + fr \cos\varphi = o$$

d'où l'on tire

$$\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} \text{ ou } \tang \varphi = \frac{fr}{\sqrt{R - f^2 r^2}},$$

L'angle de tirage maximum sera évidemment donné à priori par $\varphi = 90°$, car dans ce cas on aurait $x = P$. En considérant l'équation $\frac{x}{P} = \frac{fr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}}$, on voit que dans le cas où le frottement serait assez grand pour qu'on ait $\sqrt{R^2 - f^2 r^2}$ égal à fr ou plus petit, ce qui donnerait tang $\varphi =$ ou > 1. et par suite $R =$ ou $< fr\sqrt{2}$, il y aurait plus d'avantage à porter le fardeau qu'à le trainer ; mais alors les voitures ne doivent pas être employées; cela ne peut avoir lieu que dans les passages abruptes des montagnes.

Ce que nous venons de voir est relatif au tirage théorique; actuellement nous allons considérer ce qui se passe dans la pratique. On a déjà dit qu'Edgeworth, en faisant des expériences sur des voitures très-bien conditionnées et sur des routes de la meilleure construction, avait trouvé que le tirage pratique était égal à cinq fois le tirage théorique. Cette différence qui varie avec la nature des routes était dûe à la flexibilité des roues et aux obstacles que

les routes présentent. Pour généraliser, représentons par n le rapport du tirage pratique T' au tirage théorique T, de sorte que nous avons

$$T' = n\,T = \frac{nfr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}}.$$

L'introduction de ce rapport modifie la valeur de x et de tang φ qui deviennent alors

$$x = \frac{nPfr}{\cos\varphi\sqrt{R^2 - f^2 r^2} + nfr \sin\varphi}$$

et

$$\text{tang}\,\varphi = \frac{nfr}{\sqrt{R^2 - f^2 r^2}}.$$

Comme on a en général $f < 1$, et $r < R$, le terme f^2r^2 est assez petit pour être négligé et alors $\sqrt{R^2 - f^2r^2}$ devient sensiblement égal à $\sqrt{R^2}$; par suite

$$\text{tang}\,\varphi = \frac{nfr}{R}.$$

Ceci étant établi, connaissant les valeurs de R et de r et considérant nf comme le rapport du frottement à la pression, on peut chercher la valeur de l'angle de traction minimum dans les différentes circonstances qui peuvent se présenter.

Le rapport $\frac{R}{r}$ varie nécessairement suivant les voitures dont il s'agit. Dans les affûts anglais de campagne, pour le calibre de 6, par exemple, on a $\frac{R}{r} = 28$. Pour les voitures de campagne de Gribeauval il est égal à 24 et dans celles du nouveau matériel à 23 1/2 seulement. Pour les avant-trains de Gribeauval $\frac{R}{r} = 19$.

Voici les angles de traction minimum calculés pour le système de roues auxquels ces valeurs de $\frac{R}{r}$ ont rapport, et dans les différentes circonstances qui peuvent faire varier la quantité nf.

$\frac{R}{r} =$	28	24	20	18	10
Angle de traction minimum dans le cas de $nf = 3$ ce qui a lieu pour une voiture qui se meut sur une route inclinée en 1/24	6°.9'	7°.10'	8°.38'	9°.36'	17°.27

Angle de traction minimum dans le cas de $nf=2$ sur les routes mauvaises et rendues humides par la pluie.	4°.5'	4°.46'	5°.44'	6°.22'	11°.32'
—id.— dans le cas de $nf=1,8$ sur une pelouse très unie	3°.42'	4°.17'	5°.9'	5°.44'	10°.22'
—id.— dans le cas de $nf=0,8$ sur un terrain très-ferme	1°.39'	1°.54'	2°.18'	2°.32'	4°.35'

Ce tableau fait voir que généralement à mesure que le rapport $\frac{R}{r}$ diminue, l'angle de traction minimum augmente et qu'il ne faut pas tirer les voitures dans une direction parallèle au terrain sur lequel elles se meuvent. Cela résulte de la décomposition de la force de traction dont nne partie se trouve employée à diminuer la pression qu'exerce l'essieu de la voiture. Cette diminution de poids est représentée par $x \sin \varphi$ et la force qui tire le système l'est par $x \cos \varphi$; or à partir des petits angles, le sinus croît beaucoup plus rapidement que le cosinus, et il en résulte que la diminution de la composante horizontale est plus que compensée par la diminution dans la pression verticale.

En général, sur des terrains très-unis, l'angle de traction le plus favorable est de 2° environ pour les voitures du nouveau matériel et de 3° à 7° pour les voitures de Gribeauval.

Il peut du reste arriver que le rapport nf devienne très-grand ainsi en appliquant le calcul aux voitures de l'artillerie Prussienne, on trouve que lorsque les roues s'engagent dans des ornières de 20 à 22 centimètres de profondeur $nf=5$; dans des ornières de 33c nf devient égal à 15 et enfin dans des ornières de 44c $nf=24$c Mais quand les routes sont sillonnées d'ornières trop profondes, la voiture ne peut plus être considérée comme roulant sur un plan horizontal.

Considérons le tirage, lorsqu'il a lieu sur un plan incliné ; supposons d'abord que l'effort du tirage soit exercé parallèlement à ce plan ; il devra non-seulement faire avancer la voiture, mais encore la faire monter sur le plan incliné, soit ψ l'inclinaison de ce plan, P étant le poids de la voiture et p celui des roues, $P+p$ est alors le poids du système entier.

La composante du poids parallèlement au terrain sera $P \cos \varphi$; la valeur de x que nous avons trouvée, pour ce cas du mouvement sur le terrain horizontal, doit être diminuée de la composante parallèle au terrain du système et se réduira à $x-(P+p) \sin \psi$.(fig. 55).

En égalant le moment de cette résultante, par rapport au centre

de rotation, au moment du frottement sur la boîte de roue, on aura la relation, $\{x-(P+p)\sin\psi\}R = fr\sqrt{P^2\cos^2\varphi + x^2\sin^2\psi}$, puisque $P\cos\varphi$ et $x\sin\varphi$ sont les deux pressions qui agissent sur la boîte de roue; cette équation revient à

$$R^2x^2 - 2(P+p)Rx\sin\psi + (P+p)^2R^2\sin^2\psi = f^2r^2\{P^2\cos^2\varphi + x^2\sin^2\psi\},$$

ou bien :

$$x^2\{R^2 - f^2r^2\sin^2\psi\} - 2(P+p)R\sin\psi\, x = f^2r^2P^2\cos^2\psi - (P+p)^2R^2\sin^2\psi.$$

En résolvant cette équation on arrive à

$$x = \frac{(P+p)R\sin\psi \pm \sqrt{(P+p)^2R^2\sin^2\psi + \{f^2r^2\cos^2\psi P^2 - R^2(P+p)^2\sin^2\psi\}\{R^2 - f^2r^2\sin^2\psi\}}}{R^2 - f^2r^2\sin^2\psi}.$$

Considérons le cas le plus général, celui où le tirage n'est pas parallèle au sol, et soit φ l'inclinaison par rapport à l'horizon ; on aura généralement $\varphi > \psi$, et $\varphi = \psi$ pour la valeur de l'angle du tirage avec l'horizontale.

L'équation des moments de la résistance et du frottement sur la boîte, pris par rapport au centre de rotation ; doit être modifiée comme dans le cas précédent et cette équation qui était

$$\{x-(P+p)\sin\varphi\}R = fr\sqrt{P^2\cos^2\varphi + x^2\sin^2\varphi}$$

devient alors

$$\{x\cos(\varphi-\psi) - (P+p)\sin\psi\}R = fr\sqrt{P^2\cos^2\varphi + (x - P\sin\varphi)^2} = fr\sqrt{P^2 + x^2 - 2Px\sin\varphi}.$$

En résolvant cette équation du second degré, on arrive à la valeur suivante de x ;

$$x = \frac{(P+p)R^2\cos(\varphi-\psi)\sin\psi - Pf^2r^2\sin\varphi + fr\sqrt{R^2P^2\cos^2(\varphi-\psi) + P^2f^2r^2 + R^2(P+p)^2\sin^2\psi - P^2f^2r^2\sin^2\varphi - 2(P+p)PR^2\cos(\varphi-\psi)\sin\varphi\sin\psi}}{\cos(\varphi-\psi)R^2 - f^2r^2}$$

Dans les cas ordinaires de la pratique, r est beaucoup plus petit que R alors fr est très-petit par rapport à R ; les angles ψ et φ ne sont jamais grands, puisque l'inclinaison des routes ne dépasse par 1/24. On peut donc négliger les carrés de r et fr et des sinus des angles, il vient ainsi

$$x = \frac{(P+p)R^2\cos(\varphi-\psi)\sin\psi + Rfr\,P\cos(\varphi-\psi)}{\cos^2(\varphi-\psi)R^2},$$

valeur qui se réduit à

$$x = \frac{R(P+p)\sin\psi + fr\,P}{R\cos(\varphi-\psi)}$$

Cette dernière expression est suffisamment approchée pour les cas ordinaires de la pratique ; on voit que le minimum de traction aura lieu quand cos $(\varphi-\psi)$ sera un maximum ou que $\psi=\varphi$.

Lorsque le terrain sur lequel se meuvent les voitures est parsemé d'obstacles ou d'ornières, on ne peut mesurer directement l'angle ψ d'inclinaison du plan sur lequel elles font monter la voiture, mais on peut évaluer cet angle d'une manière assez approximative quand on connait le rapport du tirage théorique sur un plan horizontal résistant, au tirage qui est mesuré dans les expériences faites sur le terrain accidenté; on peut ainsi revenir à la valeur de l'angle d'inclinaison qui a dû donner le tirage observé. Connaissant cette valeur de ψ on peut la reporter dans la valeur de x et déterminer ensuite la valeur la plus favorable à donner à φ ou à l'angle que doivent faire les traits.

Nous avons trouvé :

$$x=\frac{Pfr}{\sqrt{R^2-f^2r^2}} \text{ pour le tirage théorique}$$

et

$$x=\frac{nPfr}{\sqrt{R^2-f^2r^2}} \text{ pour le tirage pratique}$$

observé. Comme on peut négliger le terme f^2r^2 qui est très-petit par rapport à R^2 on a $x=\frac{nPfr}{R}$. Il en résulte, que dans les routes coupées d'ornières, les roues sont dans le même cas que si elles marchaient sur un plan incliné dont l'angle d'inclinaison serait ψ et pour lequel on aurait

$$\frac{R(P+p)\sin\psi+frP}{R\cos(\varphi-\psi)}=\frac{nfrP}{R},$$

de là on tire

$$R(P+p)\sin\psi+frP=nfrP\cos(\varphi-\psi)$$

ou bien

$$R(P+p)\sin\psi=frP\{n\cos(\varphi-\psi)-1\}$$

et comme dans le cas des minimum de tirage on a $\varphi=\psi$, il vient :

$$R(P+p)\sin\psi=frP(n-1)$$

ou

$$\sin\psi=\frac{frP(n-1)}{R(P+p)}=\sin\varphi$$

Telle est la formule qui dans le cas général donne l'angle de traction le plus favorable. Nous n'avons pas suivi pour y arriver la marche ordinaire qui eût consisté à différencier par rapport à ψ la valeur de x, qui est dans ce cas-ci extrêmement compliquée, et cela parce que ψ varie à chaque instant. Nous avons comparé le tirage observé au tirage connu sur un chemin déterminé à l'avance et nous en avons déduit la valeur de l'angle ψ capable de faire passer ce tirage connu à la valeur observée directement. Cette valeur de ψ a été ensuite reportée dans la valeur de x qui nous a fourni alors la valeur la plus favorable pour l'angle de traction.

En opérant de cette manière on est arrivé aux résultats suivants pour les avant-trains du nouveau matériel de campagne.

NATURE DU TERRAIN.	VALEUR DE nf.	ANGLE DE TRACTION MINIMUM.
Sol très-ferme	0,75	0°56'
Pelouse	1,80	2°47'
Terre labourée . . .	5,75	6°12'
Route inclinée au 1/24. .	2,70	4°39'

Il a donc été convenable d'adopter pour l'angle d'inclinaison des traits, 6°12' puisque cet angle convient au cas de tirage le plus défavorable.

Pour les voitures d'artillerie de siége on a obtenu les résultats suivants :

NATURE DU TERRAIN.	VALEUR DE nf.	ANGLE DE TRACTION MINIMUM.
Plates-formes horizontales .	0,85	1°30'
Terrain incliné au 1/24 . .	1,79 . , . .	3°40'
Terrain horizontal. . . .	2,48	5°14'
	2,81	5°58'

L'angle de la moindre traction est comme on voit plus petit que pour les voitures de campagne. Ce qu'il y a de mieux à faire pour l'artillerie de siége, c'est de prendre une moyenne générale des angles de traction relatifs aux différents cas qui peuvent se présenter et de l'adopter.

Nous avons supposé que le rapport n entre le tirage théorique et le tirage pratique était dû aux accidents du terrain. Il y a une partie de ce rapport qui est due à l'élasticité de la roue dont le diamètre vertical peut diminuer dans les chocs, par suite de la partie du poids appliquée sur l'essieu. On peut chercher les an-

gles de traction minimum en tenant compte à part, du ploiement que la roue peut contracter. Ainsi dans le cas d'un terrain ferme et horizontal pour lequel $nf=0,75$, et $n=3,75$ (f étant égal à 0,2) on peut admettre avec beaucoup de probabilité, qu'à l'élasticité de la roue est dûe la plus grande partie de ce facteur et que cette partie est 3. L'angle dû à $n=3$ devient un peu différent de celui que nous avons trouvé plus haut ; ainsi pour l'artillerie de siége φ devient égal à 6° ou 6° 1/2 et de même pour l'artillerie de campagne cet angle de traction minimum se trouve por té à 7° ou 8°. Ce sont ces deux valeurs de φ qu'il vaut mieux admettre dans la construction des voitures.

Ces considérations sur le tirage peuvent aider à résoudre une autre question assez importante qui est celle de la hauteur la plus avantageuse à donner aux roues. L'essieu doit, comme nous l'avons déjà dit, conserver sa forme dans tous les cas qui peuvent se présenter et ne pas se fausser. Son rayon r est donc déterminé de manière à ce que la résistance nécessaire soit obtenue avec les dimensions les plus petites possibles. Il n'en est pas de même de R, parce que pour le même service on peut employer plusieurs roues différentes. Il doit nécessairement exister une valeur de R qui soit la plus avantageuse possible et c'est cette valeur de R qu'il est important de rechercher.

Au premier abord on pourrait croire que plus la valeur de R est grande, plus elle est avantageuse; mais en augmentant R on augmente le poids de la roue et comme ce poids entre dans l'expression du tirage, celui-ci augmente nécessairement avec le poids des roues. Or, ce poids p des roues augmente comme le carré de R, et l'effort à produire ne diminuant que comme la première puissance, il y a évidemment une limite au-delà de laquelle une augmentation de R ne peut être que défavorable. Pour obtenir la valeur la plus avantageuse, il faut différencier la valeur de x par rapport à R supposé variable, égaler la différentielle à zéro et en déduire la valeur de R pour laquelle x est un minimum. Nous avons en appliquant le tirage théorique au tirage pratique:

$$x=\frac{R(P+p)\sin\psi+nfrP}{R\cos(\varphi-\psi)}.$$

Mais p est fonction de R^2 et proportionnel à P ; nous le repré-

senterons donc par KPR² et nous aurons ainsi la nouvelle valeur

$$x=\frac{P\{(1+KR^2)R\sin\psi+nfr\}}{R\cos(\varphi-\psi)}.$$

Cette valeur de x devient un maximum en même temps que $(1+KR^2)\sin\psi+\frac{nfr}{R}$. Différenciant donc cette expression, nous avons $(2KR\sin\psi-\frac{nfr}{R^2})dR$ qui égalé à zéro devient $2KR\sin\psi-\frac{nfr}{R^2}=o$; de là on tire

$$R^3=\frac{nfr}{2K\sin\psi}.$$

Et en faisant n 3 pour le cas des mauvais passages nous aurons

$$R^3=\frac{3fr}{2K\sin\psi}.$$

Le rayon de roue le plus convenable auquel on arrive par cette méthode, est égal à 0m,75 et diffère très-peu des roues de campagne en usage.

Quand il s'agit de voitures destinées à porter des fardeaux, la valeur de R peut être différente. Pour les voitures qui accompagnent les batteries, on pourrait donner aux roues un poids inférieur à 200k. Les roues de derrière de Gribeauval sont en général bien disposées, on pourrait pourtant les augmenter un peu. Quand des voitures ne doivent rouler que sur des terrains bien résistants, comme les triqueballes qui ne servent que sur le pavé des villes et dans les terrains unis des arsenaux, il y a de l'avantage à augmenter le rayon des roues. Pour le matériel de siége qui peut aussi rouler sur les routes ordinaires, R doit être moindre que pour les triqueballes, mais plus grand que pour le matériel de campagne.

Voici les diamètres les plus favorables calculés pour les roues d'avant-train du nouveau matériel de campagne :

Sur un terrain très-ferme . . . . 1m,43.
Sur une pelouse . . . . 1, 18.
Dans les terres labourées . . . . 0, 97.

Pour les voitures de siége roulant sur une plate-forme, le diamètre=3m,00.

On a fait en Angleterre des expériences nombreuses pour trou-

ver l'expression du tirage, et à l'aide de ces expériences, on en a déduit une formule empirique qui en représente les résultats.

On a pour cela employé un charriot vide du poids de 1016^{kil} que l'on a chargé successivement de poids plus forts ; on a obtenu ainsi :

POIDS DE LA VOITURE.	EFFORTS DE TIRAGE.
1016^{kil}.	13^{kil},2
1270.	33, 5
1520.	47, 0
1780.	63, 5

Appelant T le tirage exprimé en kilogrammes on a trouvé les deux formules suivantes ; la première

$$T = \frac{P+p}{93} + \frac{P}{40} + \frac{3}{2} CV,$$

est relative au terrain horizontal; C exprime un certain coëfficient et V la vîtesse du système ou du cheval qui le traine.

La deuxième qui est relative aux terrains inclinés est

$$T = \frac{P+p}{93} + \frac{P}{40} + \frac{3}{2} CV \pm \frac{h}{l}(P+p),$$

Suivant que la voiture monte ou descend, $\frac{h}{l}$ qui représente l'inclinaison du terrain, doit avoir le signe positif ou négatif.

V, vîtesse du cheval est ordinairement égale à 1^{m},13 par seconde. Quant à C on a trouvé qu'il devait avoir une valeur variable: sur le terrain soit pavé, soit revêtu de madriers, C=2, sur une route bien faite en pierres tassées et par un temps sec C=5, sur une route couverte de poussière C=8. Cela prouve qu'il y a un grand avantage à nettoyer le chemin que doit parcourir une voiture. Sur une route couverte de boue C=10; sur une route en petits cailloux nouvellement chargée, C=13 ; enfin sur une route semblable, couverte de boue, C=32.

La valeur du tirage théorique est de beaucoup inférieure à celle que l'on trouve dans la pratique. Il existe pourtant des espèces de routes sur lesquelles les deux résultats se rapprochent beaucoup ; ainsi depuis 2 ans, on a construit à Londres un chemin pavé en blocs de granit parfaitement assemblés et qui conduit de la ville au port de la compagnie des Indes ; on a fait des expériences sur le tirage et on a trouvé : 1° qu'un petit cheval Poney, faisant un

effort de 80k^il^, pouvait y tirer 15300k^il^ ; 2° qu'un fort cheval du poids de 711k^il^ et faisant un effort de 160k^il^, pouvait y traîner 31000k^il^, l'un et l'autre avec une vitesse de 1 lieue 6 dixième à l'heure. Il y a, comme on voit, dans cette espèce de route un avantage considérable, et quand le terrain ne cède pas on est à peu près dans les mêmes circonstances que sur les chemins de fer, qui favorisent considérablement le tirage, et le rapprochent alors du tirage théorique.

Le cheval étant le moteur employé le plus généralement pour mouvoir les voitures, il est nécessaire de considérer la manière dont il déploie sa force de traction, parce que la hauteur des points d'attache des traits à la voiture et l'inclinaison la plus favorable au tirage en dépendent. Nous verrons plus loin que ce principe qui est vrai pour les voitures à deux roues, ne l'est pas moins pour les voitures à quatre roues.

Le cheval agit sur les traits par l'intermédiaire d'un collier ou d'une bricolle, qui vient appuyer sur son poitrail de manière à ne pas le blesser. Les jambes de devant ne font que soutenir le poids de la partie antérieure du corps et ce sont les jambes de derrière qui impriment l'effort de traction exercé par le cheval ; les jambes de devant sont pour cette raison verticales dans le plus grand nombre de cas, et c'est le jarret de derrière qui contribue le plus, par son jeu et par sa force, à l'effort qui porte en avant la voiture à laquelle le cheval est attelé. Quand le jarret est hors de la ligne de tirage, soit en dehors soit en dedans, le tirage est moindre parce que le jarret peut alors s'infléchir plus facilement. Le cheval de trait doit donc généralement être conformé de manière qu'il ait les jambes antérieures très voisines de la verticale et les jambes de derrière inclinées. Les jambes de derrière ont bien à porter une partie du poids du corps, mais cette partie est beaucoup moindre que pour les jambes de devant, qui sont beaucoup plus rapprochées du pied de la verticale passant par le centre de gravité : cela a même encore lieu quand le cheval est chargé de son cavalier. Il résulte de cette conformation et de cette direction, que dans l'avant-main le cheval porte le fardeau et ne le tire pas.

Appelons f le rapport du frottement à la pression pour le fer du cheval sur le sol, soient mn, qr les directions des pieds de devant

et de derrière du cheval, *lo* la direction du collier, *mt* la direction des traits faisant un angle φ avec l'horizon; v et v' les pressions verticales des pieds sur le sol H et H' les efforts horizontaux; b la distance des pieds de devant aux pieds de derrière, a la distance du collier au point d'appui des pieds de devant, c la distance des pieds de devant à la verticale passant par le centre de gravité G, et suivant laquelle agit le poids P du cheval: soit enfin T le tirage exercé par le cheval. (fig. 56.)

Pour déterminer les équations du mouvement de ce système sollicité par plusieurs forces, sans nous occuper du mode d'action musculaire, nous pourrons égaler à zéro les sommes des composantes horizontales et verticales, puis égaler entre eux les moments de rotations inverses par rapport aux pieds de derrière ; on obtient ainsi pour les composantes horizontales

$$T \cos \varphi - H - H_{,} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Pour les composantes verticales

$$P + T \sin \varphi - v - v' = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

et enfin pour les moments de rotation

$$T \ (a \cos \varphi - b \sin \varphi) + v\, b - P\, (b - c) = 0 \quad . \quad (3)$$

Nous avons ainsi un système de trois équations seulement, pour les inconnus H, H', v, v', T. La question est donc indéterminée; cela tient à ce que le mode d'action du cheval n'est pas défini à l'avance et qu'il peut agir différemment, suivant sa conformation. Il faudrait encore deux conditions pour que le problême fut déterminé. (fig. 57.) Nous avons vu que H était peu de chose tant que la ligne des traits ne passe pas en avant des pieds de derrière, on peut donc supposer H très-petit et se contenter de calculer H + H'; si ensuite on connait T pour un angle φ déterminé à l'avance, on aura une quatrième relation et la question sera déterminée.

On parvient facilement à isoler v, v', H + H' et T en supposant que H + H' ne forme qu'une seule inconnue. En effet, en multipliant la deuxième équation par b il vient

$$P\, b + T\, b \sin \varphi - v b - v' b = 0$$

retranchant celle-ci de la troisième, on aura

$$T\, (a \cos \varphi - b \sin \varphi) + P\, c + T\, b \sin \varphi - v'\, b = 0,$$

d'où

$$P\, c - v'\, b + T\, a \cos \varphi = 0,$$

et

$$v' = \frac{Pc + Ta\cos\varphi}{b} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

de la troisième équation on tire immédiatement

$$v = \frac{P(b-c) - T(a\cos\varphi - b\sin\varphi)}{b} \quad \ldots\ldots (5)$$

et enfin de la première on tire

$$H + H' = T\cos\alpha.$$

Plus le terrain est uni et résistant, plus le frottement f est petit, il peut même diminuer au point que les pieds du cheval glissent et que celui-ci ne puisse développer un effort égal à $H + H'$. C'est ce qui arriverait sur la glace, par exemple, où les chevaux ne peuvent marcher qu'à l'aide de crampons adaptés aux fers. Pour que cela n'ait pas lieu, il faut que l'on ait à la fois $H < fv$ et $H' < fv'$.

On peut donc prendre pour limite de ces efforts horizontaux $H = fv$ et $H' = fv'$ et par conséquent $H + H' = f(v + v')$. Dans ce cas l'équation $T = \frac{H+H'}{\cos\varphi}$ devient $T = f\,\frac{v+v'}{\cos\varphi}$ et donne le plus grand tirage que le cheval est susceptible d'exercer. Au moyen de cette relation la première équation devient ;

$$T\cos\varphi - f(v+v') = c.$$

Multipliant la deuxième par f et l'ajoutant à la première il vient :

$$T\cos\varphi - Pf - Tf\sin = \varphi\, o$$

d'où

$$T = \frac{Pf}{\cos\varphi - f\sin\varphi} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

c'est la plus grande valeur du tirage, quand les traits sont inclinés à l'horizon suivant l'angle φ ; le cheval ne peut le dépasser sans glisser.

Il est facile de déterminer de même les valeurs générales de v et de v', en reportant cette valeur de T dans les valeurs de v et v' que nous avons déterminées plus haut ; ces valeurs sont :

$$v = \frac{P(b-c)}{b} - \frac{T(a\cos\varphi - b\sin\varphi)}{b}$$

et

$$v' = \frac{Pc}{b} + \frac{Ta\cos\varphi}{b};$$

elles deviennent par la substitution de la valeur de T,

$$v = \frac{P}{b}\left\{(b-c) - \frac{f(a\cos\varphi - b\sin\varphi)}{\cos\varphi - f\sin\varphi}\right\} = \frac{P}{b}\left\{\frac{(b-af)\cos\varphi}{\cos\varphi - f\sin} - c\right\}$$

$$v' = \frac{P}{b}\left\{ c + \frac{af\cos\varphi}{\cos\varphi - f\sin\varphi} \right\}.$$

Par suite, comme $H = fv$ et $H' = fv'$ on a pour les valeurs générales de H et H',

$$H = \frac{Pf}{b}\left\{ \frac{(b-af)\cos\varphi}{\cos\varphi - f\sin\varphi} - c \right\},$$

$$H' = \frac{Pf}{b}\left\{ c + \frac{af\cos\varphi}{\cos\varphi - f\sin\varphi} \right\}.$$

Il est intéressant de connaître aussi, le cas où le tirage sera un minimum. D'après la forme même de la valeur de T qui ne contient au numérateur que les constantes P et f, il est clair que ce minimum aura lieu quand le dénominateur $\cos\varphi - f\sin\varphi$ sera un maximum. Or, cette condition est déterminée par la condition $\frac{d(\cos\varphi - f\sin\varphi)}{d\varphi} = 0$ ce qui donne $-\sin\varphi - f\cos\varphi = 0$ ou $\tang\varphi = -f$. Cette direction est comme on voit au-dessous de l'horizon.

Il résulte de ce qui vient d'être dit, qu'on peut déterminer la force de traction d'un cheval quand on sait quelle est la nature du terrain sur lequel il agit: en supposant au cheval un poids moyen $P = 500^{kil}$. et l'inclinaison des traits horizontaux, c'est-à-dire, $\varphi = 0$, on trouve par la formule $T = \frac{Pc}{\cos\varphi - f\sin\varphi}$ les résultats suivans :

NATURE DU TERRAIN.	VALEUR DE f.	FORCE DE TRACTION. MAXIMUM.
Sur une plate-forme, ou chemin sec. . .	$\frac{1}{3}$	166^{kil}.
Sur le pavé	$\frac{1}{4}$	125
Sur le marbre poli	$\frac{1}{5}$	100
Sur la fonte	$\frac{1}{6}$	84
Sur le fer	$\frac{1}{7}$	72
Sur la glace	$\frac{1}{30}$	17.

Mais sous des directions au-dessus de l'horizon, l'effort pourrait être plus grand.

Si le cheval peut poser les pieds sur un sol raboteux, la résistance qu'il éprouve est toujours assez grande, et l'effort qu'il peut exercer ne dépend plus que de ses forces musculaires.

Après avoir déterminé le maximum d'effort que peut exercer un cheval, relativement au frottement de ses pieds sur le sol, il n'est pas moins important de déterminer ce maximum relativement au cas où le soulèvement est possible.

La troisième équation T $(a \cos \varphi - b \sin \varphi) + vb - P(b-c) = o$, n'est pas toujours satisfaite quand φ n'est pas positif, c'est-à-dire, quand la direction des traits n'est pas au-dessus de l'horizontale; alors v doit être égal à zéro et l'on a

$$T(a - b \tan \varphi) \cos \varphi = P(b-c)$$

d'où

$$T \cos \varphi = \frac{P(b-c)}{a - b \tan \varphi},$$

dans cette relation, T cos φ est le tirage horizontal. On voit par là que le cheval devra s'allonger, en augmentant ainsi la quantité b au numérateur et diminuant le dénominateur, alors le tirage T cos φ pourra être augmenté jusqu'à ce que l'obstacle soit vaincu.

Connaissant pour un cheval le poids P et les dimensions a, b, c, on peut déterminer, pour les valeurs de T cos φ qu'il peut produire sans glisser, les angles φ qu'on peut donner aux traits pour qu'il ne soit pas renversé. On voit par là que les chevaux très-lourds sont susceptibles d'un grand effort de tirage, tandis que les chevaux fins et légers en développent beaucoup moins; d'ailleurs les chevaux destinés à la selle sont beaucoup plus exercés des pieds de devant, et leurs muscles plus développés, tandis que chez les chevaux de trait, ce sont au contraire les pieds de derrière qui le sont le plus. Aussi quand on fait passer un cheval de trait à la selle, on remarque généralement qu'il est faible du devant.

Voici comparativement les angles d'inclinaison des traits les plus favorables à l'action du cheval, pour trainer un fardeau sur les espèces de sol relativement auxquelles nous avons donné plus haut les efforts maximums qu'il peut exercer,

NATURE DU TERRAIN.	VALEUR LA PLUS FAVORABLE DE φ.
Chemin sec	18° 20'
Pavé.	14° 00
Marbre poli	11° 5'
Fonte	9° 40'
Fer	5° 40'
Glace	1° 52'.

cet angle est comme on voit très-petit quand le frottement est très-petit lui-même ; la force de traction horizontale des chevaux sur les surfaces très-unies serait elle-même très-faible, s'ils étaient attelés suivant la manière ordinaire. Mais quand il s'agit de faire mouvoir des fardeaux sur la neige ou sur la glace, on emploie un autre mode d'attelage ; on donne dans ce cas une grande inclinaison aux traits, et on se sert de trainaux très-abaissés et glissants sur le sol. Il résulte de là par suite de la grandeur de l'angle sous lequel le cheval exerce son action, qu'une partie du poids de la voiture est reportée sur le cheval et s'ajoute à l'action de son propre poids. De cette pression plus forte résulte un frottement plus considérable et la possibilité d'une action plus grande sur le fardeau.

Dans certains cas même, il peut y avoir plus d'avantage à porter le fardeau qu'à le traîner, c'est lorsque f est très-petit, comme sur le roc, ou sur la glace, où le cheval ne peut déployer aucune partie de sa force. Mais lorsque le terrain est assez accidenté pour que les chevaux puissent développer leur force, sans que leurs pieds glissent, il y a avantage à employer la traction; l'on a alors les valeurs (4), (5), (6) trouvées plus haut, (H et H' n'étant plus alors limités par les valeurs de fv et de fv')

$$v'=\frac{cP}{b}+\frac{Ta\cos\varphi}{b},\ v=\frac{P(b-c)}{b}-\frac{T(a\cos\varphi-b\sin\varphi)}{b}\ \text{et}\ H+H \quad T\cos\varphi.$$

Ces valeurs serviront à déterminer en fonction de T les quantités dont on peut désirer la connaissance.

On a fait à Metz en 1816 des expériences sur la force des chevaux et l'on a trouvé que la traction sous l'angle de 6 à 7° est généralement de 400^{kil} et sous 10 à 12° de 425^{kil}; au-delà de cette inclinaison la composante verticale augmentant beaucoup, les pieds de derrière ne sont plus capables du même effort horizontal et pour 15 à 16°, par exemple, on ne trouve plus que 382^{kil}.

Les équations que nous avons trouvées établissent bien le maximum d'effet dont les chevaux sont susceptibles. Il pourrait arriver qu'en disposant les traits de la manière la plus favorable en théorie, on fatiguât le cheval outre mesure, et qu'on lui ruinât les pieds de derrière; ce ne serait que par expérience qu'on pourrait déterminer l'angle de traction le plus favorable dans la pratique.

Il est encore à remarquer que, sur une route inclinée, les pieds

de derrière du cheval sont plus chargés que sur une route horizontale et que quand un cheval attelé porte en outre un cavalier, la direction des traits doit être modifiée pour tenir compte du poids qu'il porte. Dans l'artillerie Francaise, les porteurs sont plus chargés que les sous-verges ; pour éviter cet inconvénient on a proposé d'adapter une sellette au harnais du sous-verge, et d'y placer le porte-manteau du canonnier conducteur, de cette manière on soulagerait le porteur, en équilibrant un peu les efforts des deux chevaux. Dans le mode de chargement et de harnachement adopté, les deux files de chevaux tirent différemment, aussi dans les pas difficiles on voit que les sous-verges tendent à être soulevés, tandis que les porteurs résistent à cause du poids qu'ils ont à porter.

On a comparé l'usure des fers des chevaux sur les routes à l'usure des bandes ou des cercles de roues d'après le nombre de lieues parcourues par les chevaux de messageries et par les voitures, le temps au bout duquel il faut remplacer la ferrure des chevaux et des roues, et le poids des fers et des bandes ou cercle de roues, avant et après leur service. A ce sujet, on a trouvé en Angleterre qu'en général, un cheval de diligence use sur la route 1 kil. 8 de fer par 100 lieues; une voiture de poste du poids de 2000 kil. n'use dans le même parcours que 2 kil.. 4 de fer; or cette voiture est attelée de 4 chevaux, de sorte que l'usure complète de l'attelage est de 7 kil. 2. Les roues usent donc trois fois moins de fer que les pieds des chevaux.

Quand les voitures sont plus lourdes, les chevaux n'usent pas plus de fer, tandis que les roues en usent d'avantage. Ainsi une diligence du poids de 2800 kil. environ, attelée de 4 chevaux, use en considérant à la fois l'attelage et la voiture, 14 kil. 6, quand les voitures sont tirées avec une vîtesse de 3 lieues 1/2 à 4 lieues par heure; quand les voitures sont très-lourdes et ne parcourent que 1 lieue à 1 lieue 1/2 par heure, les chevaux n'usent plus que 1 kil. 3 par 100 lieues, parce qu'ils posent le pied plus sûrement et que par suite le frottement est moindre; mais les roues usent à-peu-près autant. Ainsi une voiture de 5300 kil. use 5 kil. 3 de fer par 100 lieues; on voit par là que dans le cas des voitures très-rapides les chevaux usent trois fois plus de fer que les roues, tandis que dans le cas d'une marche lente, les chevaux et les roues en usent

à-peu-près la même quantité. Une circonstance qui a pu influer sur la différence des résultats précédents, c'est qu'en Angleterre les voitures légères de poste, au lieu d'avoir des roues à bandes plates ont des roues à bandes convexes. Il résulte de cette disposition, que ces roues, lorsqu'elles rencontrent des cailloux, les écartent et passent sans les écraser comme si elles roulaient sur un terrain uni. S'il résulte de cette forme des bandes de roues une moindre usure des roues des voitures, elle produit une plus prompte détérioration des routes.

La réunion du cheval à une voiture produit sur le premier plusieurs effets. Lorsqu'un cheval est attelé à une voiture à deux roues et qu'il lui communique un mouvement en avant, il en résulte un frottement à la partie inférieure des roues qui tend à faire abaisser la partie antérieure; cet effet augmente d'autant la pression exercée sur le sol par les pieds du cheval qui a ainsi à supporter une partie du fardeau à traîner. L'inclinaison de la route produit un effet du même genre. Comme le centre de gravité de la voiture chargée se trouve généralement au-dessus de l'essieu, si la voiture monte, le centre de gravité se rapproche de l'arrière et le cheval est moins chargé; il peut même arriver que le devant de la voiture soit soulevé, et c'est pour contrebalancer cet effet que, dans certaines circonstances, les rouliers se mettent sur les brancards de leurs voitures. Dans les descentes, au contraire, la pression sur le devant tend à surcharger le cheval; c'est là un désavantage des voitures à deux roues qui sera d'autant plus petit que le centre de gravité sera le plus près de l'essieu. Dans les voitures à quatre roues les pressions accidentelles qui s'exercent dans les montées et dans les descentes n'ayant d'autre effet que de reporter un poids plus grand sur les grandes ou sur les petites roues le centre de gravité peut être élevé au-dessus de l'essieu sans grand inconvénient, à moins toutefois d'augmenter, pour la voiture, les chances de verser.

Les relations que nous avons déterminées entre les forces qui agissent sur les voitures à deux roues restent les mêmes dans les voitures à quatre roues, parce que l'avant-train se trouve dans le même cas que s'il était le moteur appliqué à l'arrière-train. Le point de réunion des deux trains peut être placé de différentes manières. Dans l'ancien système d'artillerie il est placé au-dessus

de l'essieu, et la résistance de l'arrière-train tend à faire lever le timon. Cette action est très-grande dans les avant-trains de siége de Gribeauval, où la cheville ouvrière est surhaussée, et le cheval est soulevé dans les montées; dans les descentes, au contraire, l'avant-train pèse sur lui d'une partie de son poids et le fatigue beaucoup. Sous ce rapport cet avant-train est vicieux, dès que la voiture ne chemine plus en terrain horizontal; Gribeauval a un peu corrigé ce défaut dans les avant-trains de campagne en rapprochant de l'essieu le point de réunion des deux trains. Mais cet avant-train du nouveau matériel est combiné de manière que l'arrière-train n'ait pas d'action notable sur le timon et n'exerce pas de pression sur le cheval.

Dans le système de Gribeauval, les chevaux sont attelés à des palonniers qui sont mobiles dans tous les sens, tandis que dans les voitures du nouveau matériel ils le sont à une volée fixe; par suite le cheval en marchant, posant alternativement sur le pied droit et le pied gauche, il en résulte un frottement du collier ou de la bricolle plus fort dans le deuxième cas et qui à la longue peut blesser le cheval. Mais si plusieurs chevaux sont attelés en file à un même palonnier, comme ils ne marchent pas au même pas, cet avantage n'a plus lieu, c'est ce qui arrive pour les chevaux de devant. Cet avantage des palonniers est donc assez borné. Si deux files de chevaux sont attelées à une volée mobile avec palonniers, à moins du plus grand ensemble dans leurs efforts, la voiture ne reçoit que des à coups successifs qui ne pourront pas toujours la faire sortir d'un mauvais pas.

Avec une volée fixe au bout du timon, lorsque les files tirent différemment, le tirage a toujours lieu sur le trait extérieur de la file en arrière, et le trait intérieur de l'autre. La première agit ainsi avec un plus grand bras de levier, et un effort qui ne serait qu'une faible partie de celui de la file la plus avancée peut rétablir l'équilibre. Par suite, les oscillations sont très-faibles et la somme des efforts sur le timon est toujours égale à la somme des actions des chevaux qui tirent.

Généralement lorsqu'on emploie les palonniers, on modifie le moyen d'attache de la volée en la fixant au bout du timon par deux chaînettes; de cette manière quand une file tire plus que l'autre son effort tend à rapprocher de l'axe les chaînettes de volée. Il

résulte de là que la distance de la direction de l'effort à l'axe de la voiture diminue d'un côté tandis qu'elle augmente de l'autre et que la position normale des files est moins difficile à rétablir.

Les volées de bout de timon ne doivent donc pas porter de palonniers et ceux-ci ne sont bons qu'aux volées de derrière et lorsqu'un seul cheval agit sur eux. Dans le nouveau modèle, où chaque file est de trois chevaux, les palonniers seraient sans utilité, et comme d'ailleurs ils sont peu solides on ne les a pas adoptés.

Dans le nouveau matériel on a construit les deux trains de manière à ce qu'ils fussent indépendants l'un de l'autre; et pour cela, on ne les a reliés que par un seul point; cela leur a permis de rester unis dans une position quelconque. Il a fallu par suite que le timon fut porté par les chevaux, de manière à ne pas osciller outre mesure; l'on a dû en suspendre le bout au collier des chevaux. Dans le système de Gribeauval, la voiture était disposée de manière à ce que le timon se maintenait horizontal quand la bouche à feu était dans ses encastrements de route. Sur le champ de bataille, c'est-à-dire, quand la pièce était placée dans ses encastrements de tir, on mettait l'affût à la prolongue; les chevaux ayant alors à supporter le timon, ils se trouvaient chargés d'un poids 5 à 6 fois plus grand que dans le système actuellement adopté. Il est vrai que cela n'arrivait que devant l'ennemi; mais comme dans cette position on manœuvrait ordinairement dans des terres labourées, le cheval se trouvait justement dans la circonstance où il avait le plus d'efforts à produire. Il faudrait pour que le timon fut maintenu horizontalement, que le poids de la partie en arrière de l'essieu put faire exactement équilibre au poids du timon, ou autrement que le moment de la pression sur la sassoire fut égal au moment du timon pris par rapport à l'axe de l'essieu.

Dans le nouveau système, le timon ne peut être soulevé par la pression de la flèche, qui n'est pas même suffisante pour lui faire tenir la position horizontale, parce qu'elle ne doit pas dépasser 200 kil. pour la facilité de la manœuvre. Les Anglais, pour obtenir l'horizontalité du timon ont rendu plus grand le moment de la pression de l'affût en augmentant la longueur des armons; de cette manière la cheville ouvrière est beaucoup plus en arrière de l'essieu que dans notre nouveau matériel. Mais il en résulte ce grand

inconvénient, que quand les roues rencontrent des obstacles, l'une tend à avancer, et l'autre à reculer et que l'effet transmis au timon l'étant à l'aide d'un grand bras de levier, le timon ballotte à droite et à gauche et va frapper les chevaux du côté opposé à l'obstacle. Cet effet peut être assez grand dans les mauvais terrains pour briser les jambes des conducteurs ou tuer les chevaux. Pour obtenir l'horizontalité du timon, il n'y a d'autre moyen que de donner deux points d'attache aux deux trains; l'on reviendrait ainsi au système de Gribeauval. On a bien pensé à employer les ressorts pour la suspension du timon, mais comme ils ne pourraient offrir une solidité suffisante on y a pareillement renoncé.

Lorsqu'une voiture n'a que deux roues, rien ne l'empêche de prendre autour de sa position une direction quelconque et de l'avancer dans cette direction par l'action du moteur animé qui la traîne. Il n'en est plus de même lorsque la voiture est à quatre roues. Il y a alors deux essieux, dont la position relative détermine le mouvement possible dans le roulement de la voiture. En effet, chaque roue est obligée de s'avancer perpendiculairement à l'essieu, cet essieu ne peut donc exécuter qu'un mouvement de rotation autour d'un point quelconque de sa direction; mais si les deux essieux sont liés ensemble d'une manière fixe, le mouvement doit être commun et ne pourra se faire qu'autour de l'intersection commune des directions des essieux. Pour la même position des essieux, chaque point de la voiture décrira un cercle autour de ce point d'intersection comme centre; le rayon du tournant dépendra par conséquent de l'inclinaison des essieux et il sera le plus court possible quand les deux essieux feront entre eux le plus grand angle que permet la construction de la voiture.

Dans cette position, le point de la voiture le plus éloigné du centre de rotation décrit la plus grande circonférence (le centre peut se trouver facilement par un tracé graphique) et détermine ainsi l'espace minimum dans lequel la voiture peut tourner. Cet espace n'est pas toujours absolument nécessaire, quand le sol n'est pas limité par des obstacles verticaux; il suffit alors de considérer la circonférence décrite par les roues et par les pieds des chevaux de derrière, les autres pouvant passer au-delà de cette limite; cela a lieu sur une chaussée non bordée d'arbres et n'aurait plus lieu dans une rue ou dans un défilé entre des rochers.

On n'aurait pas besoin d'un aussi grand espace si l'on pouvait mouvoir les trains à force de bras, ou par des mouvements successifs d'avant et d'arrière, ainsi que le font les cochers dans des rues souvent étroites; mais on ne doit pas compter sur un pareil moyen à la guerre, avec les longues colonnes de voitures.

L'espace nécessaire au tournant dépend ainsi de la longueur du timon, de la longueur des essieux, de leur écartement et de l'angle du plus grand tournant. Dans une charette dont les brancards sont courts, cet espace dépend de la longueur de l'essieu.

Le corps de voiture moins large des affûts du nouveau matériel, a permis de donner aux roues de devant une hauteur égale à celles de derrière. Gribeauval avait été forcé de prendre pour les affûts une roue d'avant-train moins haute, de cintrer le flasque et de l'élever beaucoup au-dessus de l'essieu, sans obtenir encore un tournant aussi facile que dans le nouveau matériel; le tournant de caisson est plus grand que celui des affûts, et c'était le contraire dans l'autre; cependant les caissons devant suivre les pièces sur le champ de bataille, leur mobilité ne doit pas être moindre.

Travaux exécutés dans les arsenaux.

Avant de parler des travaux exécutés dans les arsenaux, il est nécessaire de jeter un coup-d'œil rapide sur les divers matériaux qui y sont mis en œuvre, sans toutefois revenir sur leurs propriétés générales, qui sont du ressort des cours spéciaux de chimie et de résistance des matériaux.

Les machines de guerre devant être à la fois très-mobiles et très-solides, afin de pouvoir résister aux chocs violents et réitérés auxquels elles sont soumises, les substances dont elles sont formées ne peuvent être ni molles ni fragiles; elles doivent cependant se laisser travailler avec facilité.

Les métaux et les bois sont les matières dont l'expérience a prescrit l'emploi dans les constructions de l'artillerie. Les premiers, soit purs, soit à l'état d'alliage, joignent à une grande dureté et à une grande ténacité à froid, l'avantage de prendre facilement à chaud toutes les formes que leur emploi nécessite. Les se-

conds, en outre de la légèreté qui leur est propre, jouissent d'une élasticité suffisante pour amortir les chocs que reçoivent les machines, sans se déformer sensiblement. Du reste, la pratique ayant fait connaître les propriétés distinctes de ces corps, c'est à la sagacité des constructeurs à déterminer l'espèce et la qualité la plus convenable qu'on doit employer dans chaque cas.

Métaux.

La ductilité des métaux varie sensiblement suivant la manière dont on agit sur eux. L'action qu'on leur fait subir pour éprouver leur ductilité peut être exercée par un marteau, par une filière ou par un laminoir. Avec le marteau, le métal n'éprouve qu'une pression violente dans un seul sens; avec la filière, le métal est tout à la fois tendu dans un sens et comprimé de tous les autres côtés à la fois; au laminoir, la compression et l'extension n'ont lieu que dans un seul sens. Il est nécessaire d'examiner les propriétés des métaux, suivant les diverses circonstances, pour juger sainement de leur ductilité. Le tableau suivant des ductilités comparatives des métaux dans les trois cas signalés, feront ressortir la différence de ductilité :

NOMS DES MÉTAUX.	ORDRE DE DUCTILITÉ.		
	AU MARTEAU.	A LA FILIÈRE.	AU LAMINOIR.
Plomb	1	8	5
Étain	2	7	4
Or	3	5	1
Zinc	4	6	6
Argent	5	2	2
Cuivre	6	4	3
Platine	7	1	7
Fer	8	3	8

Ténacité des métaux.

La ténacité des métaux est une des propriétés les plus importantes à considérer. Cette ténacité consiste dans la force avec laquelle chaque espèce de métal résiste à la rupture. En opérant sur des barreaux de divers métaux de 1 centimètre de côté, on a obtenu les pressions qui peuvent en déterminer la rupture lorsqu'elles

agissent dans le sens des fibres des barreaux. Les résultats de l'expérience sont contenus dans le tableau suivant :

Noms des métaux.	Pressions nécessaires pour opérer la rupture.		
Plomb	120 kil	à	135 kil
Etain	330 kil		
Cuivre	1340 kil	à	2400 kil
Fer	4000 kil	à	5000 kil

On voit qu'il y a un grand avantage à construire en fer les boulons et les pièces qui supportent des efforts dans le sens de leurs fibres.

Quant à l'écrasement des métaux il est produit par des forces extrêmement variables ; nous y reviendrons plus loin.

Emploi des métaux.

Le fer employé à l'état naturel et forgé sert à la construction des canons, des armes portatives, fusils, mousquetons et pistolets. Comme il est doué d'une très-grande ténacité, on peut, pour ces objets, l'employer avec des épaisseurs beaucoup moindres que les autres métaux. Les premiers fusils nommés canons à mains furent d'abord construits en bronze ; mais leur poids était tellement considérable qu'à eux seuls ils suffisaient à la charge d'un homme, et qu'on ne pouvait les tirer qu'en les plaçant sur un soutien solide. Les boulons comme on l'a dit plus haut, les frettes et cordons de roues, qui ont à contenir le moyeu et à empêcher les fibres de se séparer, sont aussi en fer forgé. Le même métal sert à recouvrir le bois, comme dans les plaques de recouvrement des crosses, les bandes de roues, les sous-bandes etc. En résumé le fer forgé sert à relier, fretter et cordonner les pièces qui tendent à se désunir.

Le fer est employé aussi à l'état de fonte à cause de sa dureté, de son peu de valeur à cet état et de la facilité avec laquelle on peut le mouler. La fonte est ainsi adoptée pour la construction des bouches à feu de côte et de la marine, pour la confection des roulettes d'affûts de place et de côtes, etc., des gros projectiles, comme boulets, obus et bombes ; on doit généralement en éviter l'emploi dans les affûts à cause de sa grande fragilité.

On a déjà cité les expériences de La Fère, où des affûts de fonte ont été brisés du premier coup, non-seulement par des boulets, mais encore par des obus. Ils ont en outre dans le cas de rupture, le

grave inconvénient de se briser du même coup en un grand nombre de fragments, qui agissent comme autant d'éclats de projectile et qui seraient extrêmement meurtriers dans les batteries.

L'acier est adopté pour les parties destinées à supporter de grands frottements, comme les bouts de crosses-lunettes. Les ressorts des armes portatives, et les baguettes de fusils sont pareillement en acier. On peut composer avec l'acier et le fer, une combinaison qui porte le nom d'étoffe et dont l'emploi est avantageux dans certains cas.

Le bronze qui se façonne avec facilité et avec précision est employé à confectionner les boîtes de roue, les écrous de vis de pointage, les globes d'éprouvette et les poulies. Le cuivre pur ne sert guère qu'à former les grains de lumière et des douilles d'écouvillons et de lanternes qui, destinées à toucher fréquemment les poudres, ne pourraient être en fer sans exposer à de graves accidents. On a vu que sous ce rapport le cuivre était le moins dangereux parce qu'il ne pouvait, comme le fer, lancer par le frottement des limailles enflammées, bien qu'il pût comme lui enflammer la poudre par suite d'un choc violent.

La ténacité des métaux employés pour la construction des bouches à feu ne doit pas être estimée à la température ordinaire, puisque celle des bouches à feu peut s'élever beaucoup par le tir, et que la ténacité des métaux diminue à mesure que la température augmente. On n'a pas encore fait d'expériences sur l'influence de la température quand il s'agit de la fonte, mais on sait que le bronze, qui est capable de supporter par centimètre carré une pression de 4000^{kil}. à 0°, ne supporte plus que 2900^{k} à 60°, de 2700^{k} à 2800^{k} à 80°, 2600^{k} à 120°, de 2000 à 2100^{k} à 160°, et enfin 1100 à 1500^{k} à la température à laquelle la poudre s'enflamme, ce qui correspond à 240° ou 250° de Réaumur.

Il n'est pas moins important de connaître à l'avance la quantité dont les métaux peuvent s'allonger avant que la rupture ne se manifeste. L'expérience a appris que le bronze peut s'étendre de 1/6 de sa longueur à 0°, de 1/14 à 80° et de 1/17 seulement à 140°. Cette propriété est un très-grand avantage parce qu'elle avertit du moment où le métal cesse d'avoir l'élasticité suffisante pour résister aux pressions qu'il a à supporter et qu'il faut prendre des précautions. La fonte ne présente pas cet avantage, car elle ne

peut s'allonger au plus que de 1/225 avant de se rompre ; cela est la cause des accidents fâcheux, qui résultent fréquemment de l'emploi des bouches à feu en fonte. C'est la même raison qui interdit avec ces mêmes bouches à feu, l'emploi des fortes charges ; celles-ci occasionnent promptement des fissures intérieures qui demeurent invisibles à l'œil, mais qui n'en hâtent pas moins la rupture de la bouche à feu. Si le métal était susceptible de se refouler ou de se tasser, cet inconvénient n'aurait plus lieu.

Lorsqu'un métal a été chauffé fortement et qu'on le laisse refroidir le calorique se dégageant, il s'opère un rapprochement entre les molécules ; leur arrangement varie souvent beaucoup, suivant que le refroidissement a été prompt ou lent, tranquille ou troublé ; les différences peuvent même être visibles à l'œil. De là résultent diverses qualités qu'on peut donner à une même substance. Ainsi la fonte employée à confectionner les projectiles varie beaucoup dans ces différents cas, et offre un grain tout à fait dissemblable. Les dimensions mêmes des projectiles changent à cause de la dilatation du métal; s'il se refroidit très-vite, la contraction ne peut pas s'opérer à l'intérieur, s'il se refroidit lentement au contraire ,toutes les parties viennent à leurs dimensions primitives. Le bronze devient très-ductile et très-sonore par un refroidissement rapide, mais il n'est pas avantageux de l'employer à cet état pour la construction des bouches à feu. La trempe ne fait éprouver aucun changement à l'or et à l'argent et elle donne à l'acier des qualités précisément opposées à celles qu'elle donne au bronze ; il devient aussi beaucoup plus dur, mais cassant. Après la trempe de l'acier, ont peut employer le recuit, suivant qu'on veut que ce métal ait une plus ou moins grande dureté. Les bouts de crosses-lunettes sont trempés secs.

Les métaux écrouis ou comprimés fortement sont ordinairement plus durs, mais aussi plus cassants.

Toutes les fois quele fer est étiré en barres, les fibres sont disposées dans le sens de sa longueur et sa ténacité devient plus grande, aussi emploie-t-on à la confection des boulons du fer de fil étiré dans sa longueur.

Le bronze coulé à une température très-élevée devient plus dur et l'on a remarqué qu'il en est de même aussi lorsqu'il reçoit plusieurs coulées successives. C'est ce qui fait qu'en certains pays, le

bronze avant d'être coulé dans les moules, l'est une première fois en lingots.

Enfin, le fer est réellement plus cassant au-dessous de 0° et l'on a observé en Suède qu'à des températures qui allaient à 35° au-dessous de 0° la fonte ne devenait nullement plus fragile.

La densité du bronze est très variable, bien que sa composition reste constante et fixée à 100 parties de cuivre pour 11 d'étain. La densité du bronze obtenue par des expériences faites à Toulouse a été de 8,7026 tandis qu'elle devait être de 8,6675. Le degré de température auquel se fait la coulée a lui-même une grande influence sur la densité, et dans les mêmes épreuves de Toulouse on a trouvé qu'elle pouvait varier de 8,1400 à 8,6666. Pour calculer le poids d'une bouche à feu, l'on peut employer à la densité moyenne, 8,626.

La densité de la fonte de fer varie dans les forges de 6,958 à 7,106 ; en prenant la moyenne sur une grande quantité de projectiles on a trouvé 7,032 au lieu de 7,207 qui est la densité de la bonne fonte. Cette différence provient des soufflures ou vides intérieurs que le refroidissement du métal fait naître dans le corps des projectiles; car les petits éclats sans soufflures pesés individuellement donnent les premiers nombres.

Le plomb fondu pur a une densité de 11,358 ; mais lorsqu'il est coulé en balles cette densité est de 11,180 seulement. Cette différence tient au retrait intérieur occasionné par le refroidissement qui s'opère de la circonférence au centre. On a cherché à y remédier et l'on y est à peu près parvenu en maintenant les moules à balles à une température peu inférieure à celle où le plomb entre en fusion: le refroidissement des couches extérieures étant moins brusque, le vide intérieur ne se manifestait pas ; mais comme sa présence n'a réellement pas d'influence sur la justesse du tir, on peut négliger ces précautions sans aucun inconvénient.

Bois.

Plusieurs espèces de bois sont employées aux constructions de l'artillerie. Le chêne, à cause de sa dureté, de sa force et de sa durée est avantageusement employé pour former des pièces de grande résistance. L'orme peut être employé à défaut de chêne et offre une résistance suffisante dans le sens de ses fibres, bien qu'il

soit moins dur et d'un moins long service que celui-ci. Le noyer est cassant, peu tenace, et offre des nœuds; mais comme il peut se tailler dans tous les sens, il est précieux pour le bois des armes portatives; si les Russes lui ont substitué le bois blanc c'est parce qu'il sont dépourvus de noyers. Le hêtre est encore moins durable. Le frêne est avantageux pour faire des flèches de voiture et des timons. Le sapin est employé à construire les madriers, les poutrelles des équipages de ponts, et les hanches des chèvres, les planches et le fond des bordages des bateaux et les coffrets à munitions.

Une règle pratique souvent mise en usage dans le débit de bois en grume, consiste à prendre les côtes dans le rapport de 5 à 7. Cette règle qui est assez bonne dans le cas où le bois doit exercer sa résistance, comme les poutres, par exemple, a été étendue aux constructions d'artillerie ; mais on l'a appliquée à tort au tracé des rais, parce qu'elle n'est vraie que dans le cas de la résistance latérale des bois et non dans celui des résistances longitudinales ou verticales.

Les bois ne sont pas dans un état permanent comme les métaux; après s'être formés par la végétation, leur séparation du sol ne les constitue pas en corps stables; les parties liquides s'évaporent d'abord ; les parties tendres et visqueuses se dessèchent et se solidifient ; enfin les parties les plus dures se durcissent encore. Ces effets qui commencent au moment de la coupe des bois et continuent un plus ou moins grand nombre d'années, suivant la nature de l'essence du bois et les circonstances dans lesquelles il est placé, occasionnent des changements notables dans la forme et dans les dimensions des pièces. Ils durent même jusqu'à la consommation entière du bois.

Il est important d'examiner avec soin la manière dont ils se conduisent et de suivre la marche des effets successifs de la dessication, pour prévenir les inconvénients qui peuvent en résulter. Mais pour y parvenir il est bon de se rendre compte de l'organisation et de la contexture des bois.

Le bois est composé de couches dont les plus anciennes sont au centre ; comme la sève qui entretient la végétation passe toujours par les parties les plus molles de la circonférence, par l'aubier, l'intérieur se durcit ; et si l'on coupe un arbre, la sève s'évapore et le bois se dessèche, mais inégalement dans toutes ses parties.

Comme c'est le noyau qui se dessèche le moins rapidement, il en résulte qu'il se manifeste à l'extérieur des fissures qui partent de la circonférence et se dirigent vers le centre. Si une pièce de bois est coupée dans la partie qui avoisine le centre, les différentes sections des couches circulaires qu'elle comporte se dessècheront de manières différentes et la pièce se voilera. Il est nécessaire de faire sécher avec un soin particulier les bois qui doivent fournir des pièces de grandes dimensions et qui ne changent pas de forme.

Il y a de l'avantage à débiter les bois en grume avant leur dessication et à ne les employer que lorsque celle-ci est suffisamment avancée ; si les bois en grume conservent leur écorce, les couches extérieures ne peuvent se dessécher aussi rapidement et les fissures sont moins grandes. Quand il s'agit de bois destinés à la construction des moyeux il y a de l'avantage à enlever le cœur. De cette manière le bois peut se resserrer plus facilement et le défaut d'obstacle à ce resserrement empêche la formation de fissures considérables. Quand on débite les bois, il est toujours avantageux d'enlever le plateau du cœur, parce qu'alors les plateaux voisins ne sont plus composés de couches aussi hétérogènes ; la méthode qui serait peut-être la meilleure, consisterait à diviser après un an ou deux de coupe les pièces de bois par le milieu, à conserver aux deux parties leur écorce, pour empêcher la différence trop grande de dessication des couches, et à recouvrir les parties extrêmes, en laissant soumise à toute l'influence de l'air la partie la plus voisine du cœur et le cœur lui-même. Ce bon effet peut être obtenu en plaçant les pièces en recouvrement les unes des autres comme un assemblage de tuiles. (fig. 58) Les parties à l'air se dessèchent mieux et plus vite. Il en résulte que le bois éprouve un retrait à peu près égal sur toutes ses parties et ne se voile qu'assez faiblement sans que les fissures s'y manifestent. La présence de ces fissures est bien moins à craindre si l'on ne débite ces bois qu'au bout de trois ou quatre ans; elles sont d'ailleurs extrêmement nuisibles parce que les fibres une fois séparées ne sont plus capables d'autant de résistance que lorsqu'elles sont unies. En effet, la résistance perpendiculaire à la longueur des bois, est proportionnelle au carré de leur hauteur ; si cette hauteur se trouve partagée par une fissure, la résistance n'est plus proportionnelle qu'à la somme des carrés de ces deux parties de la hau-

teur, somme qui est beaucoup moindre que le carré de la hauteur totale. Pour éviter ces fissures il faut, autant que possible, se dispenser d'écorcer les bois en grume, à moins que la présence de l'écorce ne puisse les faire pourrir.

Comme les extrémités des pièces de bois se dessèchent plus vite et peuvent se fendre, on les revêt quelquefois d'une couche de résine. Il faut encore éviter les forts courants d'air qui accélèrent trop la dessication.

On reconnaît facilement combien les effets dont nous venons de parler sont désavantageux pour les assemblages employés dans les constructions d'artillerie. Il commence à se former un certain jeu des pièces entre elles, puis la dislocation arrive. On doit n'employer que des bois très-secs ou des assemblages combinés contre l'influence de ces effets. Dans les arsenaux, les bois ne sont mis en œuvre qu'après quelques années de débit, afin que la dessication ait eu le temps de s'opérer. Il peut arriver aussi que dans les magasins, les bois s'échauffent, et comme alors ils ne sont plus d'un aussi bon service, il y a des limites d'âges entre lesquelles il faut se maintenir, et c'est après 4 ans et avant 7 ou 8 qu'il faut employer les bois. Passé ce temps, ils sont sur le retour; après 4 ou 5 ans les effets de la dessication continuent bien encore à se manifester, mais on doit en prévenir les inconvénients par un mode de construction convenable.

Ainsi pour l'affût de place et de côte, dans l'assemblage des pièces qui se coupent à angle droit, au lieu d'entailler les deux pièces à mi-bois, on les entaille à recouvrement. (fig. 59). Dans le premier cas la dessication eût eu pour effet d'occasionner entre les deux pièces un jour où l'humidité se serait facilement introduite et aurait en peu de temps fait pourrir les parties en contact. Avec l'assemblage à recouvrement, au contraire, la partie formant le tenon peut bien finir par jouer dans sa mortaise; mais comme le jour se trouve alors masqué par le recouvrement, l'humidité ne peut y pénétrer et l'assemblage se conserve beaucoup mieux. Du reste, pour éviter ce jeu, il est important de n'employer que le plus rarement possible les assemblages à fibres perpendiculaires.

La partie externe de chacune des couches annuelles qui composent les bois est beaucoup plus dure que la partie interne; il en est de même pour toutes les autres couches. Mais cette dureté res-

pective augmente de plus en plus à mesure qu'on se rapproche du cœur. Il résulte de ce mode de formation que les pièces de bois sont susceptibles d'une certaine compression par suite de la présence des parties molles, tandis que les bois sont capables d'une grande résistance dans le sens de leurs fibres, parce que les parties les plus dures sont toujours dirigées dans ce sens. Dans la charpente on a généralement peu d'égard à cette compressibilité et l'on agit à peu près comme si elle n'existait pas. Quand une pièce de bois supporte une pression dans une partie délardée par une entaille, elle ne résiste qu'en vertu de l'épaisseur qu'elle a conservée en ce point; l'on doit donc autant que possible diminuer la profondeur des entrailles dans les assemblages.

L'orme et le noyer présentant une texture très-adhérente et sans fibres bien caractérisées, on s'en sert pour la construction des jantes. Le chêne qui est assez fibreux contracte des fissures lorsqu'il est employé au même usage.

L'assemblage le plus usité dans la charpente, qui est la ferme, serait d'un emploi vicieux dans l'artillerie; en effet, si les arbalétriers sont sollicités par un poids qui agit sur eux ou sur le poinçon qui les assemble, leur longueur reste constante; leurs extrémités inférieures tendent à s'éloigner, mais l'entrait ou le tiran les contient et empêche leur mouvement. D'un autre coté le poinçon diminue d'épaisseur en se dessèchant; par suite, les arbalétriers baissent à mesure que la dessication s'opère, jusqu'au point où ils appuient contre le poinçon. Tout le système s'affaisse, et afin que son affaissement ne tarde pas à le ployer, le poinçon généralement ne porte pas sur l'entrait. Pour éviter cet inconvénient, on se sert avec plus d'avantage de moises boulonnées qui assujétissent les têtes des arbalétriers appuyées l'une contre l'autre. De tels assemblages seraient mauvais dans des affûts : en voici un exemple. Au siége de Cadix, où il fallait obtenir d'énormes portées, et par suite tirer les pièces sous des angles qu'on ne pouvait atteindre avec les affûts ordinaires, on a employé l'assemblage de la forme. Deux pièces verticales supportaient les tourillons et étaient assurées en avant et en arrière par des jambes de force; à chaque coup le bois était violemment refoulé dans les assemblages des arc-boutants, dans le montant et dans la semelle; en très-peu de temps ce système était complètement disloqué.

Dans l'affût de place et de côte du nouveau système, pour éviter ces inconvénients, on a fait réagir directement les tourillons sur l'arc-boutant, et dans le sens de ses fibres; de cette manière, on a évité la compression latérale perpendiculairement aux fibres.

Quand des bois sont sollicités par une forte charge, ils s'infléchissent, et si ces actions se répètent, il en résulte un va et vient qui peut finir par disloquer les assemblages. Enfin si une pièce de bois de faible dimension porte constamment une charge considérable, il peut arriver qu'elle se rompe.

Voici les résultats obtenus par l'expérience, pour la ténacité et pour la résistance à l'écrasement des bois les plus communément employés :

BOIS.	RÉSISTANCE A LA RUPTURE.	RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT.
Chêne,	700 k à 980 k	250 k à 400 k.
Sapin,	830 à 904	180 à 500
Orme,	, 1150 k	90k

On voit, d'après ces résultats, que quand les bois doivent agir dans le sens de leurs fibres, le sapin est plus avantageux que le chêne, puisque la résistance varie entre des limites plus resserrées. Quand, au contraire, il s'agit de la résistance à l'écrasement, c'est le chêne qui a l'avantage. Il est bon d'observer ici que le sapin est de plus doué d'une très-grande légèreté.

La densité des bois est extrêmement variable. Les bois verts sont naturellement beaucoup plus lourds que les bois secs. Voici la série des densités des bois employés dans les constructions :

Bois verts	. . . .	1,286
Bois de construction à Toulouse	. . , ... ,	1,000
id.	dans les bouches du Rhône . .	0,857
id.	dans la côte d'or	0,743
id.	dans la Champagne	0,846
id.	En Lorraine dans les Vosges et la Hollande	0,640

Après avoir considéré les propriétés des bois et des métaux relativement à leur emploi dans les constructions d'artillerie, il reste à examiner la manière de les mettre en œuvre.

La pratique des arts industriels possède un grand nombre de moyens pour opérer des changements dans la forme des corps. Ils

varient non-seulement selon la nature des matériaux, mais encore suivant la qualité, les dimensions et le fini des ouvrages qu'on veut en tirer. Les métaux fusibles comme le cuivre, la fonte, l'étain, le plomb et leurs alliages sont fondus et coulés dans des moules; ces corps peuvent aussi, lorsqu'ils ne sont pas en trop grande masse, ni d'une forme trop différente de celle qu'on veut leur donner, être amenés aux dimensions désirées par l'enlèvement des parties surabondantes, soit par la section, lorsque les parties à enlever sont considérables, soit par le frottement lorsqu'il ne reste qu'à polir les surfaces ou à en enlever une très-faible épaisseur.

La compression et la percussion peuvent être employées avec avantage lorsque les métaux ou leurs alliages sont ductiles; cette opération se fait soit à froid soit en les chauffant pour les amollir; c'est de cette manière qu'on travaille le fer et qu'on arrive assez facilement à lui donner toutes les formes demandées.

La rupture peut encore être employée avec les métaux; mais comme elle tend toujours à agir sur les points les plus faibles, les résultats sont un peu vagues et ne peuvent pas toujours être prévus par l'ouvrier; aussi ne les emploie-t-il que comme transitoires, pour approcher du point où il veut arriver, en déterminant dans le corps, par d'autres moyens, un point faible, en dehors des dimensions définitives qu'il veut obtenir.

On peut donner aux bois la forme qu'on veut obtenir soit par la section, soit par la rupture de leurs fibres, soit en les fendant par la séparation de deux fibres consécutives. La partie molle des couches concentriques, offre pour cela une grande facilité dans certaines espèces. C'est en profitant de cette propriété qu'on se sert du coin avec avantage. On peut aussi changer la forme des pièces de bois en les dilatant d'un côté par l'humidité et les contractant de l'autre par la chaleur. C'est par ce procédé que l'on parvient à cintrer les bois employés dans la marine. Du reste, la forme factice obtenue ainsi n'est pas stable; l'humidité que l'air contient, tend à rendre au bois sa première forme, sans cependant qu'il puisse y revenir tout-à-fait. C'est à peu près par les mêmes moyens que l'on infléchit les douves des tonneaux qui, cerclés vigoureusement, sont obligés de conserver leur forme artificielle. Mais comme cette méthode altère les propriétés du bois, il faut

donner aux pièces à emplòyer ainsi des dimensions supérieures à celles qu'elles devraient avoir à la rigueur.

Les changements qui ont lieu dans la forme des corps par la séparation des parties, s'obtiennent au moyen d'outils ou d'instruments qui ont divers modes d'action, suivant leur espèce. Ils agissent presque tous de plusieurs manières à la fois, soit par interposition entre les particules du corps soit par disjonction des molécules, soit par extension ou déchirement des parties.

Le mode par interposition qu'on ne peut employer que pour les corps qui ne présentent pas une grande dureté, a l'avantage de donner immédiatement aux corps une forme déterminée d'avance, parce que l'action a lieu directement sur les points qui doivent subir des modifications, tandis que par les autres modes on n'agit qu'à une certaine distance de ces points et par l'intermédiaire des points voisins. Les ruptures ont lieu dans les parties dont l'aggrégation est moins forte ou qui sont placées le plus défavorablement pour résister à la puissance. Delà, nait dans les résultats une certaine indétermination qui a lieu entre des limites d'autant plus resserrées que l'instrument est plus parfait, ou que l'ouvrier qui l'emploie est plus habile. Aussi ce deuxième mode présentant beaucoup plus de combinaison que le premier, est-il d'un usage bien plus général.

Les instruments tranchants agissent par interposition, en les introduisant dans le corps qu'on veut couper. On tend à faire occuper le même espace par deux corps à la fois et il en résulte que le plus faible doit se disjoindre pour laisser place au plus dur. Dans le cas où l'on agit sur des corps fibreux, les instruments tranchants agissent d'abord par disjonction; l'arrête frappée cède sous le tranchant, mais les fibres voisines prètent leur appui à celles qui ploient et les empêchent ainsi de prendre une extension suffisante pour que la rupture ait lieu. Il faut donc que l'instrument agisse d'abord de manière à ôter aux fibres voisines la faculté de prêter appui à la fibre qu'il va couper. Souvent les instruments tranchants agissent comme le coin, qui lui même se comporte d'abord comme un instrument tranchant. Dès qu'il s'est glissé dans l'interstice de deux fibres, celles-ci se séparent, en faisant un anglé moindre que l'angle même du coin, et alors ce dernier n'agit plus que par l'effort qu'exercent les deux plans in-

clinés. Comme l'adhérence des fibres est la seule force qui s'oppose à la marche du coin, les points résistants cèdent tour-à-tour et la séparation se transmet en avant de l'outil à mesure qu'il pénètre. On pourrait bien obtenir le même effet en agissant à la fois sur toute la surface de séparation ; mais on conçoit qu'il faudrait dans ce cas un effort énorme pour obtenir le déchirement. Quand, au contraire, le coin agit perpendiculairement aux fibres du corps, il n'a plus d'autre effet que celui d'un instrument tranchant, il frotte alors par tous les points des faces immergées dans le corps. Dans ce cas, il a à vaincre l'adhérence et à trancher les fibres ; le coin est alors dans le cas le plus désavantageux.

Dans les métaux l'élasticité a une très-grande influence et produit des effets propres à chaque espèce en particulier. Il en résulte que les instruments doivent être modifiés suivant la nature même du corps sur lequel ils doivent agir. Ainsi, par exemple, les limes à fer ne peuvent servir à limer du cuivre, parce que la limaille de celui-ci les empâte bientôt, tandis que la limaille du fer s'échappe d'elle-même d'entre les dents de la lime.

La scie agit de deux manières : par séparation et par interposition. Quand on veut trancher un corps sur une épaisseur assez forte, il faut frayer à l'outil un passage assez large pour qu'il puisse, sans frottement, se mouvoir dans la voie qu'on lui trace. C'est pour cela que les dents des scies sont déjetées en-dehors de l'épaisseur de l'outil de manière à enlever suffisamment de matière pour laisser un jeu aisé à la lame de l'instrument. La scie disjoint les fibres et enlève le bois par parcelles; elle agit également par déchirement parce qu'elle n'est pas assez tranchante. Les dents tendent à entraîner les fibres qu'elles mordent, les forcent à s'étendre et produisent nécessairement ainsi le déchirement. Pour faciliter le mouvement de la scie on ne la fait agir que par des points distants les uns des autres, afin de diminuer ce déchirement autant que possible et par suite de diminuer l'effet à produire.

Dans la lime la disposition est la même et elle n'agit que par un nombre de points limités; les limes sont, en général, assez larges pour donner à l'ouvrier plus de chances de bien dresser les surfaces. Plus les surfaces à obtenir doivent être unies, plus les limes doivent être larges. Du moment qu'il s'agit de surface courbes il n'est plus nécessaire que la lime ait une largeur aussi grande. Les

limes agissent en arrachant les particules qu'elles entraînent, elles sont de différentes espèces, suivant les corps sur lesquels elles sont destinées à agir. Les limes à bois, que l'on nomme rapes, ont des dents assez faibles mais aigues et capables de s'enfoncer plus que celles des limes à métaux. Les limes à acier ont les dents plus fines et plus nombreuses. Quand on veut unir une surface très-dure on y répand de l'éméri et on agit à l'aide du frottement qui finit par polir la surface. La poudre d'éméri agit dans ce cas comme ferait une lime, seulement les dents sont mobiles et très-fines et se fixent au corps le plus mou avec lequel on frotte. On peut cependant obtenir le poli par le seul frottement avec un corps plus mou.

On voit que généralement les outils agissent en opposant le fort au faible. On peut couper l'acier trempé au moyen de la tôle quoi qu'incomparablement plus molle. Il suffit pour cela de faire passer avec une grande vîtesse le corps coupant sur le même point de l'autre corps qui finit par céder. Plus la vîtesse est grande, plus l'effet est prompt. Pour obtenir ce résultat, on monte un disque de tôle sur un tour doué d'une grande vîtesse, et quelque dur que soit le corps que l'on soumet à l'action de ce disque, il cède par suite du renouvellement rapide des surfaces agissantes. Il est probable que la forte température qui se manifeste a aussi de l'influence dans cette action, parce qu'elle devient très-élevée pour le corps coupé, tandis que le disque, par son mouvement continuel, et son passage rapide dans l'air, y perd à chaque instant la température qu'il a acquise, et que de plus, il offre un grand nombre de points continuels au frottement d'un seul. C'est ainsi que l'acier le plus fin cède à l'action du fer le plus doux. A l'atelier de précision on emploie même des disques de cuivre, pour arriver par le frottement à donner à certains instruments les dimensions rigoureuses qu'ils doivent atteindre.

Les considérations qui précèdent vont servir à déterminer les formes les plus avantageuses à donner aux pièces que l'on doit assembler dans la construction de l'artillerie.

On a vu quelles étaient les conditions générales auxquelles il importait de satisfaire dans les roues ; considérons les assemblages des parties qui les composent. Ces parties sont le moyeu, les rais et les jantes ; les fibres de ces différentes pièces sont toujours

perpendiculaires entre elles. Dans le mouvement des voitures, les roues sont pressées par les obstacles qu'elles rencontrent, comme par exemple, les ornières des chemins, de manière que les rais tendent à jouer du devant en arrière. La mortaise du moyeu tend à s'agrandir et le rai qui s'appuie contre ses bords, successivement dans tous les sens, agit comme un corps fiché dans un autre, lorsqu'on l'ébranle alternativement en divers sens, pour l'en arracher. Cependant la pression du sol, se compose avec cette action latérale et donne une composante oblique ; la mortaise s'agrandissant peu à peu, l'assemblage de la patte perd de sa solidité. Il est important que l'assemblage du rai et du moyeu soit le plus solide possible et ne permette pas le moindre jeu, parce qu'une fois ce jeu établi, il augmente rapidement.

Dans le système de Gribeauval, on donnait aux rais une épaisseur plus forte à l'extrémité de la patte, on l'introduisait de force dans le moyeu, et cette disposition devait l'empêcher de sortir aussi facilement. (fig. 60) Mais comme pour entrer en place il devait élargir la mortaise, le rai par suite était moins bien assujéti. Aujourd'hui on a adopté la disposition contraire ; la patte va en diminuant d'épaisseur ; elle est introduite de force et elle presse dans toutes ses parties. Il semblerait que par suite de cette forme, elle doit tendre à sortir ; mais cette tendance est détruite par suite du frottement considérable qui s'y oppose et qui provient de la compression du bois. Si le rai était invariablement fixé au moyeu il tendrait à se séparer de la jante, et c'est ce qui se manifestait fréquemment dans les roues de Gribeauval. Dans certains pays on traverse la patte du rai, mis en place, par une cheville plantée dans le moyeu, mais c'est une faible résistance de plus.

L'autre extrémité du rai, la broche, se loge dans une mortaise des mêmes dimensions ; autrefois pour l'empêcher de sortir, lorsqu'elle était en place, on la fendait et on introduisait dans la fente un petit coin qui servait à augmenter ses dimensions. Le retrait de la jante avait de son côté pour effet, de tirer la patte hors du moyeu. Ce mode d'assemblage a été conservé, mais seulement comme moyen de maintenir les roues avant qu'elles ne soient ferrées. Dans les rais du nouveau matériel on a laissé en avant et en arrière de la broche un petit épaulement qui n'existait qu'en dedans des rais dans les roues de Gribeauval. (fig. 61) Cet épaulement a pour

objet d'empêcher, dans le cas où la voiture est penchée, un porte à faux qui tendrait à imprimer au rai un mouvement de torsion.

Dans les roues des affûts nouveaux de place et de côte qui ont leur moyeu en fonte et dont les jantes sont remplacées par des bandes en fer forgé, les rais sont de très-fortes dimensions et ne peuvent éprouver aucune modification par suite de la dessication; l'extrémité du rai peut dans ce cas porter immédiatement sur la boîte de roue et la forme de la mortaise est indifférente. Il n'en est pas de même dans les roues ordinaires et le rai ne doit pas porter sur la boîte en cuivre, à cause du retrait du moyeu qui tendrait à faire sortir la patte : de même la broche ne doit pas atteindre les bandes des roues, parce que les rais tendraient à la chasser et à la déclouer par l'effet de la dessication. C'est pour cela que les pattes et les broches sont plus courtes que leurs mortaises.

Les assemblages à tenons et mortaises sont très-fréquemment employés dans l'artillerie. Quand le tenon n'a qu'une faible étendue comparativement à l'équarrissage des pièces qu'il doit relier; et qu'il ne pénètre que d'une petite quantité, l'assemblage est dit alors à *embreuvement*. C'est ce mode d'assemblage que l'on remarque dans les entretoises des affûts de place et de côte, où les boulons empêchent l'écartement des flasques tandis que les entretoises en empêchent le rapprochement. Elles doivent agir sur des grandes surfaces; mais il n'est pas nécessaire d'entailler beaucoup les plateaux des flasques, il suffit que l'autre pièce ne puisse changer de position

Quand deux pièces sont assemblées par leurs extrémités, on les fait entrer l'une dans l'autre le plus qu'on peut, afin que l'assemblage soit le plus solide possible; dans cet assemblage, nommé à tenon découvert, pour empêcher les pièces de se désassembler au moins dans un sens, on taille le tenon et la mortaise en queue d'aronde. Le mouvement latéral est empêché par le moyen et la séparation dans l'autre sens est rendue impossible par une ferrure adaptée à cet effet.

L'embreuvement a pareillement lieu dans les affûts de mortiers qui sont composés de flasques en fonte reliés par des entretoises en bois à embreuvement; elles ont encore pour objet dans ce cas, d'empêcher le rapprochement des flasques. Cet assemblage est d'ailleurs le seul assemblage possible quand il s'agit de réunir le

bois avec la fonte. Deux pièces, l'une en bois et l'autre en fonte ne pourraient par exemple s'assembler à tenon découvert, à cause des effets de la dessication, qui agirait d'un côté sans agir de l'autre; l'entretoise finit bien par avoir un petit jeu dans son embreuvement, mais elle ne change pas de longueur et le but auquel elle est destinée n'en est pas moins atteint.

Toutes les fois que les assemblages sont faits par entailles verticales, il est important qu'ils soient recouverts, et c'est ce que l'on fait constamment; les entailles doivent être combinées de manière à empêcher le mouvement de l'une et de l'autre pièce qu'elles relient. Ainsi, par exemple, dans le nouvel affût de place et de côte, le montant et l'arc boutant sont bien reliés par un boulon, mais celui-ci pourrait se fausser et finir par avoir un jeu qui permettrait aux deux pièces de bois de s'écarter de leur plan primitif; on obvie à cet inconvénient en laissant à chacune des pièces un tenon qui pénètre dans l'autre et empêche l'écartement en dehors du plan primitif. Le mouvement latéral étant ainsi interdit, le boulon suffit pour assurer convenablement l'assemblage. (fig. 62).

Pour assembler deux pièces de bois superposées, en outre des boulons qui les relient, on emploie de petites pièces nommées *goujons*, qui entrent dans l'une et dans l'autre pièce. Les goujons sont employés aussi dans l'assemblage des jantes entre elles, et entre les parties qui composent les flasques des anciens affûts de place et de côte. (fig. 63) Ces goujons sont destinés à empêcher tout glissement des pièces les unes sur les autres, mais dans ces affûts, les plateaux sont encore dans le même but entaillés en traits de Jupiter.

La flèche et les flasques des affûts du nouveau modèle sont reliés entre eux par des rondelles en fonte qui fixent l'écartement de ces pièces entre elles et permettent à l'eau et à la boue de passer sans y séjourner; les rondelles de derrière ont des tenons encastrés dans la flèche et les flasques; leur objet est d'empêcher tout mouvement vertical du flasque par suite de la pression que leur impriment par l'action du tir les tourillons de la bouche à feu. (fig. 64)

Les affûts de siége ont un corps d'essieu en bois sur lequel les flasques reposent et s'encastrent par leur partie inférieure. De la sorte, il ne peut y avoir de mouvement indépendant de l'une ou de l'autre partie. Le corps d'essieu en bois porte de plus en arrière une entaille qui est destinée à recevoir un épaulement de la flèche;

celle-ci est délardée à la tête et à la partie par laquelle elle repose sur le corps d'essieu; cela a dû être fait pour rapprocher l'axe du canon de l'essieu, mais comme ce délardement diminue d'autant la résistance de la flèche, on a pratiqué dans le corps d'essieu une entaille où une petite partie de la flèche vient se loger avec toute son épaisseur, ce qui lui permet de résister plus efficacement; sans cela, la partie du corps d'essieu située en dessous se briserait avec une grande facilité. (fig. 65).

Les assemblages des diverses pièces qui composent les avant-trains demandent plus de solidité que tous les autres parce que ceux-ci servant d'intermédiaire entre le moteur et le fardeau à mouvoir, il lui transmet l'effort exercé par les chevaux. (fig. 66). Dans l'ancien matériel l'action des chevaux de devant est imprimée à l'extrémité du timon par la volée qui y est fixée; la traction s'exerce alors suivant la longueur de ce timon; mais dans les tournants elle s'exerce aussi latéralement, pour vaincre le frottement de la sassoire; ce timon parconséquent doit avoir des dimensions plus fortes que dans les voitures de campagne du nouveau matériel, où les chevaux agissent tous sur les volées de derrière. Les timons des voitures qui sont tirées en dedans de leur axe ont beaucoup à souffrir et sont plus exposés à se briser et d'autant plus facilement qu'ils sont plus longs.

Le timon doit à la fois être relié solidement à l'avant-train et pouvoir se remplacer facilement lorsqu'un accident le met hors de service. Pour satisfaire à ces deux conditions, on a rapproché les armons de manière à ce qu'ils comprennent entre eux un espace précisément égal en dimensions au tétard du timon. Une frette et deux boulons relient ces pièces entre elles. Quelques coups de marteau suffisent pour faire glisser la frette; une fois les écrous enlevés, les deux boulons se tirent facilement et le timon se remplace promptement. De la sorte, la question de solidité est reportée sur l'assemblage des armons avec les autres parties de l'avant-train. Dans les anciennes voitures de campagne, les armons se trouvent placés entre le corps d'essieu et la sellette, et ces deux pièces dans lesquelles s'encastrent les armons sont reliées par deux étriers d'essieu. La sellette n'est pas en contact avec le corps d'essieu. Cette disposition est indispensable pour qu'on puisse remédier facilement à la diminution de la grosseur des armons par l'effet de la dessication, en resserrant les écrous des boulons d'assemblage et

des étriers d'essieu de façon que les armons se trouvent toujours fortement serrés.

Les chevaux sont attelés à des palonniers liés aux extrémités d'une volée fixée sur les armons; l'effort du moteur, qui s'exerce aux extrémités de cette volée est reporté à la sellette à l'aide de deux tirans en fer qui y sont fixés. De cette manière, tous les mouvements de traction sont bien répartis sur cet avant-train pour vaincre les obstacles que les routes peuvent présenter au roulage. L'effort de résistance exercée sur la cheville-ouvrière est vaincu par la sellette, qui fait corps avec le reste de l'avant-train. La sassoire n'étant pas destinée à transmettre des efforts de traction, il n'est pas nécessaire qu'elle soit aussi solidement fixée. Elle n'a besoin de résistance que dans le sens vertical et elle doit par conséquent s'encastrer dans des entailles. Les crochets appliqués aux extrémités des armons servent à attacher la prolonge, et comme celle-ci est en outre enroulée autour des armons, les crochets n'ont pas besoin d'une solidité très-grande.

Dans les avant-trains de campagne du nouveau matériel, le timon n'est pas soumis aux efforts de traction, aussi il suffit de le fixer entre la fourchette par un seul boulon facile à enlever. La bride qui entoure la fourchette suffit pour empêcher que le timon ne prenne un mouvement vertical autour de son seul point d'attache; l'effort des chevaux est appliqué directement à la volée fixée invariablement aux armons et aux deux branches de la fourchette; l'assemblage se fait par deux entailles opposées et par un boulon à chaque point d'attache de cette volée avec les armons et avec la fourchette; ceux-ci transmettent l'effort des chevaux à l'essieu. Pour cela, à l'extrémité de la fourchette est pratiqué un trou qui donne passage à un boulon dont la tête fixe le crochet cheville-ouvrière et dont l'écrou est appuyé contre la rosette arrêtoire, entre les branches de la fourchette. Les armons sont reliés au corps d'essieu par des entailles à peu près à leurs extrémités; il était assez difficile de rendre leurs assemblages très-solide. Pour y parvenir cependant, au lieu d'un seul boulon qui eût fixé les deux armons à la fois et qu'il eut été très-difficile de mettre en place à cause de la grande longueur et de retirer pour faire des réparations, à cause de la rouille, on a fait pénétrer dans le bois, à chaque extrémité du corps d'essieu, la tête aplatie d'une pièce

en fer nommée patte à tige; cette tête aplatie étant percée d'un trou, reçoit un clou rivé dont la tête affleure le corps d'essieu en dessus; la patte à tige empêche tout glissement de l'armon sur le corps d'essieu.

Le crochet cheville-ouvrière est fixé par le boulon qui traverse l'extrémité de la fourchette et par deux autres boulons qui passent par les deux trous pratiqués à l'avance dans les essieux d'avant-trains. On voit par là, que les avant-trains de l'ancien et du nouveau matériel sont combinés de manière à présenter une grande solidité.

Dans l'avant-train de siége de Gribeauval, la résistance de la voiture est appliquée à un point très-élevé au-dessus de l'essieu; et par suite les brancards agissent sur le cheval de bas en haut pour le soulever; ils tendent donc à être brisés à leur jonction avec la sellette et le corps d'essieu et doivent y être fixés très-solidement. Aussi pour donner plus de résistance au système on a entouré la cheville-ouvrière d'une cravatte en fer qui est reliée au bras du limonier par deux arcs-boutants également en fer.

Il est utile de connaître le prix de revient de divers objets du matériel de l'artillerie, le temps et la quantité des matières employées à leur confection. Le tableau suivant contient le nombre de journées de 12 heures de travail nécessaires à la confection de chaque espèce d'affût ou voiture d'artillerie, la quantité de bois et de fer qui y est employée en tenant compte des pertes qui ont lieu dans le travail et les prix auxquels reviennent au gouvernement chacune de ces voitures. Le poids du bronze employé pour les boîtes de roues et les écrous de vis de pointage est compris, pour les affûts, dans l'estimation du fer. Ces résultats sont les moyennes obtenues pour les huit arsenaux de construction de la France.

DÉSIGNATION DES VOITURES.		NOMBRE DE JOURNÉES D'OUVRIERS.	QUANTITÉ DE BOIS.	QUANTITÉ DE FER OU BRONZE.	PRIX.
Artillerie de Campagne.	affûts de 12 et d'obusiers de 6°	250	1m,82	688kil	1350 fr.
	affûts de 8 et d'obusiers de 24	235	1, 75	682	1300
	Caissons à munitions	224	2, 00	686	1150
	Chariots de batterie	221	1, 90	650	1240
	Forges	294	1, 56	760	1415
Artillerie de Siége.	affûts de 24	274	2, 40	1060	1800
	affûts de 16	266	2, 50	1040	1750
	Chariots porte-corps	225	2, 58	951	1488
	Charrettes	88	0, 90	240	450
Chèvres de place et de campagne		83	0, 65	186	530
Artillerie de Montagne.	Affûts d'obusiers de 12	78	0, 27	84	240
	Caissons à munitions	10	0, 054	4	25
Equipage de ponts.	Nacelles	65	1, 66	54	290
	Haquet à bateau	152	1, 52	540	1000
Deux roues de campagne		»	0, 40	110	183
Affûts de mortiers de 10° et de 12°		50	0, 50	1290	600
Rechanges pour une batterie de campagne		150	5, 02	784	1500

Le matériel d'artillerie d'une grande puissance est toujours considérable; pour en donner une idée, nous ferons connaître la situation de celui que possédait la France en 1818, époque où cependant elle était réellement dégarnie et n'avait pas l'approvisionnement nécessaire.

Tableau du matériel d'artillerie de la France en 1818.

Bouches à feu de siége	Françaises		5000
	Etrangères		1308
Bouches à feu de campagne	Françaises		4400
	Etrangères		1300
Bouches à feu en fer			4000
Affûts de siége de canons			1400
Affûts d'obusiers de 8_{po}			250
Affûts de campagne			2000
Affûts d'obusier de 24 et de 6°			650
Affûts de place			2650
Affûts de mortiers			1300
Affûts de côte			2650
Affûts français non classés			550
Boulets, bombes et obus			6,000,000
Poudres	En munitions à canons	kil.	1,330,000
	En cartouches d'infanterie	kil.	1,000,000
Poudre en barils		kil.	5,670,000
Fusil français			850,000
Fusils étrangers			50,000
Sabres français			360,000
Sabres étrangers			4,000

Les commandes en temps de paix étaient établies avant 1830, de manière à construire en 10 années, dans les huit Arsenaux français les quantités d'affûts et de voitures ci-après savoir :

Affûts de campagne dont 1/5 de 12 et 4/5 de 8	1200
Affûts de siége dont 1/2 de 24 et 1/2 de 16	1000
Affûts de place et de côte	4000
Affûts de mortiers 3/10 de 12° 3/10 de 10° et 4/10 de 8°	1000
Caissons à munitions	3700
Chariots de batteries	450
Forges	500
Chariots de parc	400
Chariots porte-corps	450

Charrettes	300
Hacquets	110
Bateaux	90
Nacelles	18
Triqueballes à treuil	100
Chèvres	500

Depuis 1830 les commandes ont été à peu près doubles de celles-là.

La grande quantité de matériel que l'on doit conserver, l'espace qu'il nécessite et la valeur qu'il a , exigent qu'on apporte les plus grands soins à son emmagasinement dans les arsenaux; il est bon de donner quelques notions sur les différents modes d'emmagasinement ou d'engerbement de ce matériel. La poudre est conservée, comme on sait , dans des barils , mais ce n'est pas ici le lieu de s'en occuper.

Les projectiles qui sont en fonte se conservent à l'air ; ils peuvent bien se rouiller à la vérité , mais si l'on a soin de les placer dans des courants d'air, l'eau qui les couvre s'évapore promptement et la couche d'oxide n'est jamais considérable. On les dispose en piles régulières pour pouvoir les compter promptement et facilement ; la couche inférieure est ordinairement enfoncée dans le sol d'un demi diamètre afin que la pression des couches supérieures ne puisse faire écrouler la pile , en faisant rouler les projectiles de la base. Comme ces derniers se rouillent beaucoup plus que les autres, on se sert pour la confection des bases , de projectiles déjà hors de service. On a proposé de placer les bases , sur des tasseaux ou des grilles en fer, mais l'excès des dépense que cette disposition exigerait y a fait renoncer. Pour avoir la somme des boulets d'une pile, on calcule le nombre des boulets d'une des faces triangulaires inclinées , et l'on multiplie le nombre trouvé par le tiers de la somme des trois arètes parallèles , ce qui revient à considérer la solidité d'un prisme triangulaire à bases non parallèles.

Les bouches à feu sont aussi placées à l'air sur des chantiers en bois, les anses en dessous. En Angleterre on les établit sur des chantiers en fonte à larges bases. (fig. 67).

Quant aux parties du matériel qui sont construites en bois, elles ne peuvent être laissées à l'air , où la poussière et la pluie les auraient bientôt mises hors de service en pourrissant les assemblages.

Les armes portatives sont graissées avec soin, placées sur des râteliers réguliers qui facilitent beaucoup la surveillance. Les sabres sont empilés par couches. Quant aux ferrures des voitures elles sont peintes à l'huile afin d'être sauvées autant que possible de l'influence de l'humidité.

Pour que les affûts et les voitures occupent le moins de place possible, il faut les engerber, et pour cela, souvent on les démonte en partie. Comme les affûts de siége sont difficiles à manœuvrer, on les dispose ordinairement de la manière suivante: On place le premier affût parallèlement au mur, le deuxième tourné en sens inverse, la flèche ou les crosses appuyées sur la tête du premier et de manière à ce que les roues se touchent ; le troisième et les suivants sont placés dans le même sens ; les crosses du troisième portent sur la vis de pointage du deuxième et les roues se touchent par les bandes. On peut encore disposer les affûts de manière à ce que les roues se croisent alternativement en dedans et en dehors et soient rapprochées autant que possible les unes des autres, c'est-à-dire, en plaçant les jantes contre les essieux ; de la sorte tous les affûts pairs et impairs sont alignés entre eux. Cette méthode d'engerbement est un peu difficile. Ainsi placés les affûts occupent 5^m carrés de surface pour la première méthode et 4^m pour la deuxième.

Les affûts de campagne peuvent s'engerber de la même manière; mais comme ils sont plus légers on peut les disposer d'une autre manière. On ote les roues, on dresse les affûts sur leur tête, les essieux dans la direction du rang et se chevauchant entre eux ; les crosses des affûts du premier rang sont appuyées contre un des murs de face; le deuxième rang est placé de même, mais appuyé sur le premier. Quant aux avant-trains et aux roues on les engerbe à part. Chaque affût occupe ainsi 1^m9 de surface. Les affûts de place et de côte anciens, s'engerbent en otant les roues : quand on en a un grand nombre et beaucoup d'emplacement on les place à la suite les uns des autres en mettant les roues contre les essieux, ils occupent aussi 4 mètres de surface. Si l'espace manque on les place debout sur leur tête, les essieux dans la direction des rangs se touchant par leurs bouts, le dessous des affûts du premier rang faisant face au mur. Les affûts du deuxième rang sont placés en sens contraire dans les intervalles de ceux du premier rang et ainsi

de suite pour les troisième et quatrième rangs. Ainsi placé, chaque affût occupe 3m50 de superficie. Pour emmagasiner les caissons à munitions, on enlève les coffrets et il reste alors des corps de voiture susceptibles de s'empiler. Les caissons de Gribeauval qui ont le corps très-long sont séparés de leur avant-train et placés verticalement à la file. Ils occupent 3m à 3m25. Si l'on manque d'espace, on ote les roues, on place un premier rang dont les essieux sont jointifs, puis entre eux on place un second rang sur chantier. Ils n'occupent ainsi que 1m75 à 2m; les chariots de parc s'engerbent de la même manière; il en est de même des forges, dont on a soin d'enlever préalablement les coffres et les soufflets. Chacune de ces voitures occupe 3 mètres; on démonte les roues des chariots à canon qui occupent 2 mètres environ. Les chariots du nouveau matériel une fois démontés s'empilent par couches et les charrettes de même; elles occupent 1m 50. Les chassis de place occupent 1m 25, montés et 1m0 seulement démontés. Enfin les chassis de côte, montés occupent 1 mètre et démontés 0m75.

FIN.

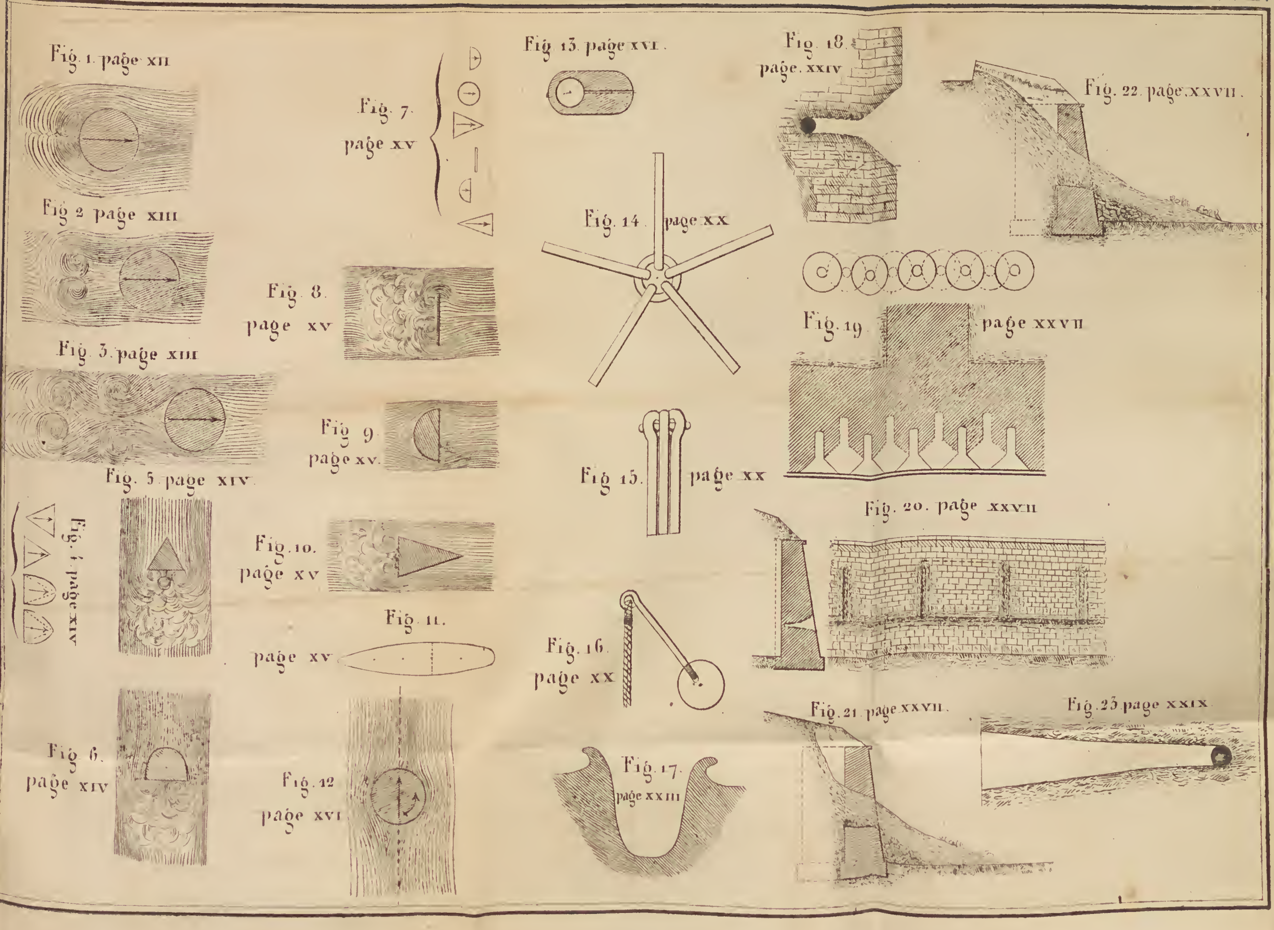


Fig. 1. page XII
Fig 2 page XIII
Fig. 3. page XIII
Fig. 4. page XIV
Fig. 5. page XIV.
Fig. 6. page XIV
Fig. 7. page XV
Fig. 8. page XV
Fig 9. page XV.
Fig. 10. page XV
Fig. 11. page XV
Fig. 12 page XVI
Fig. 13. page XVI.
Fig. 14. page XX
Fig 15. page XX
Fig. 16. page XX
Fig. 17. page XXIII
Fig. 18. page XXIV
Fig. 19. page XXVII
Fig. 20. page XXVII
Fig. 21. page XXVII.
Fig. 22. page XXVII.
Fig. 23 page XXIX.

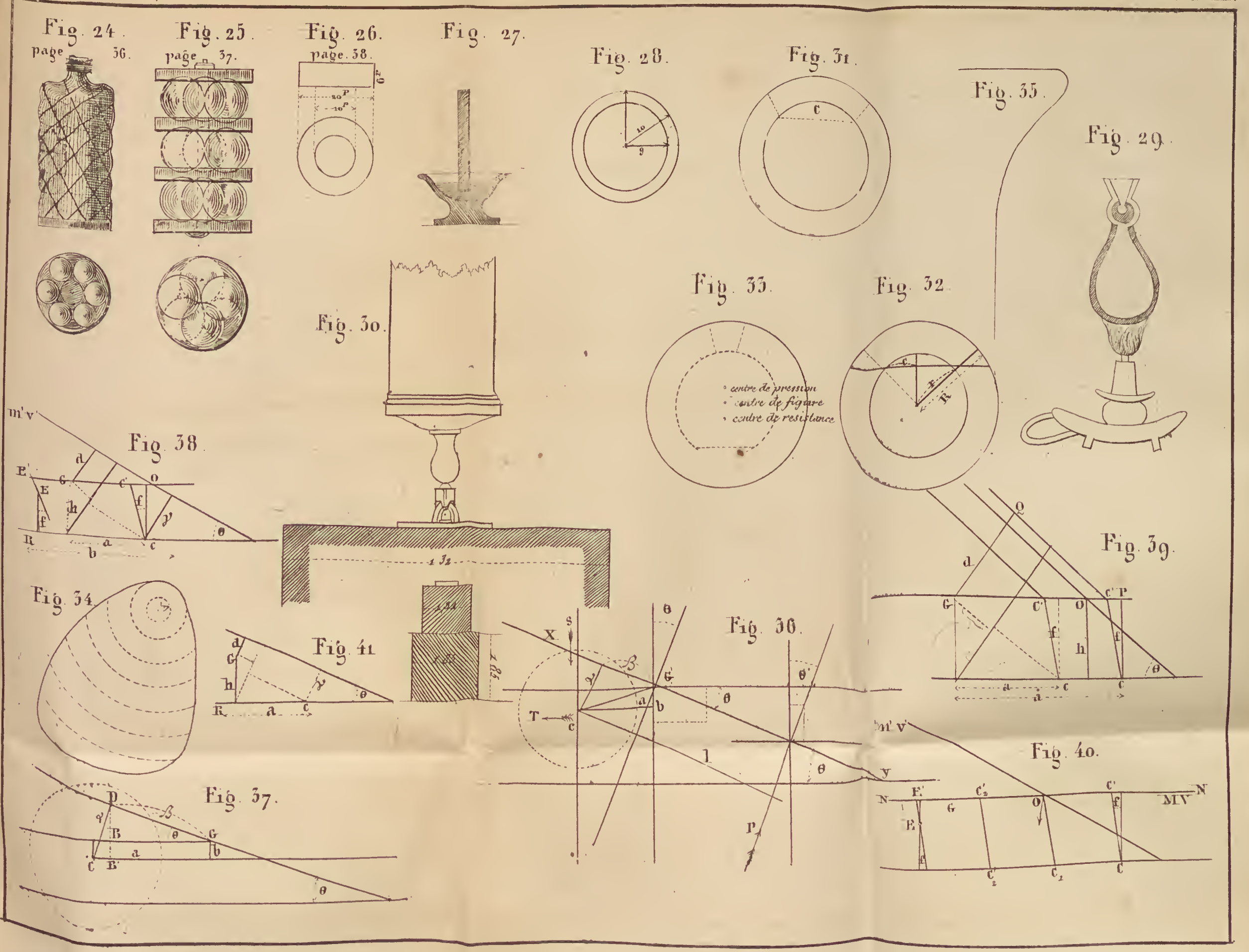


Fig. 24.
page 36.
Fig. 25.
page 37.
Fig. 26.
page. 38.
Fig. 27.
Fig. 28.
Fig. 31.
Fig. 35.
Fig. 29.
Fig. 30.
Fig. 33.
Fig. 32.
centre de pression
centre de figure
centre de resistance
Fig. 38.
Fig. 39.
Fig. 34.
Fig. 41.
Fig. 36.
Fig. 40.
Fig. 37.

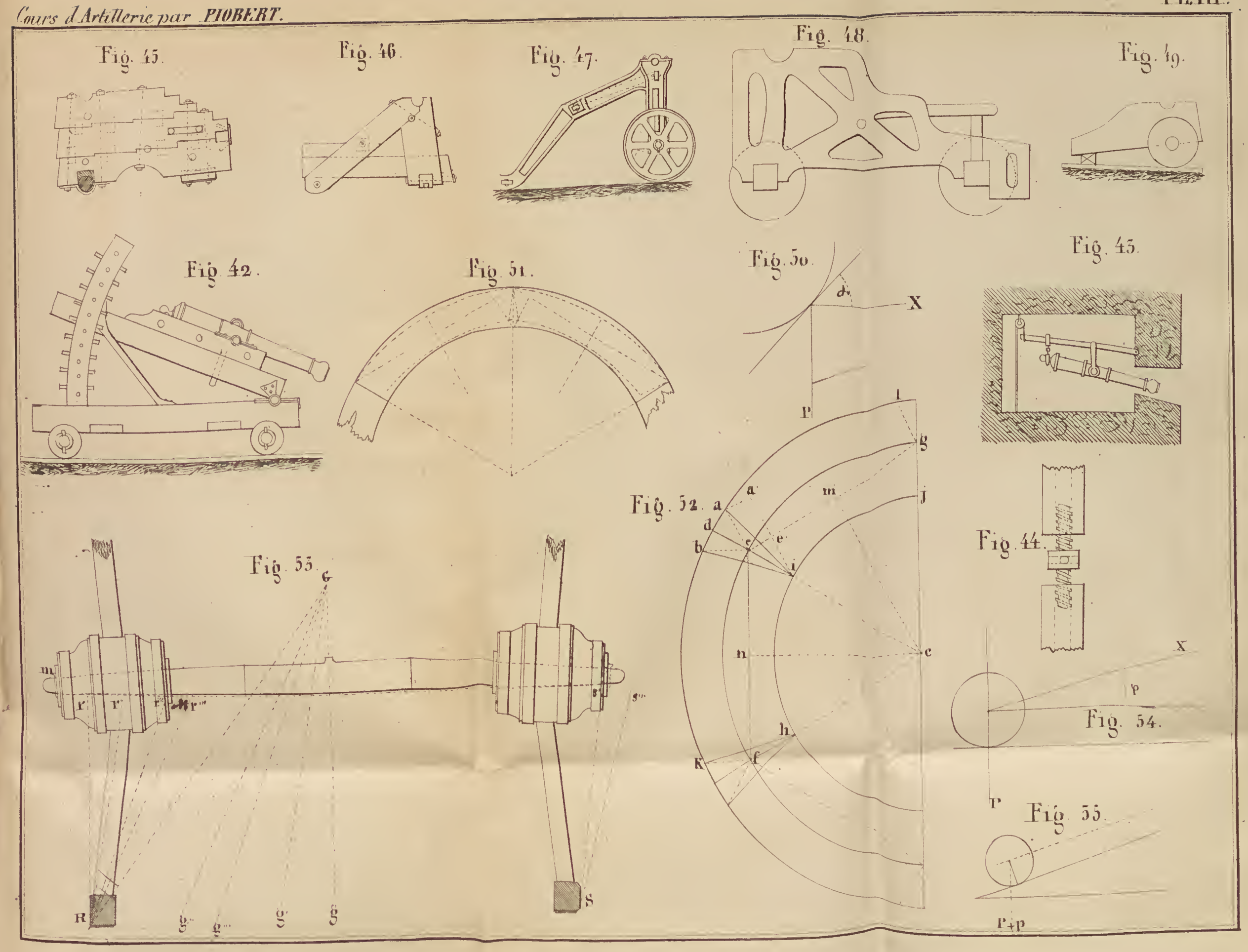
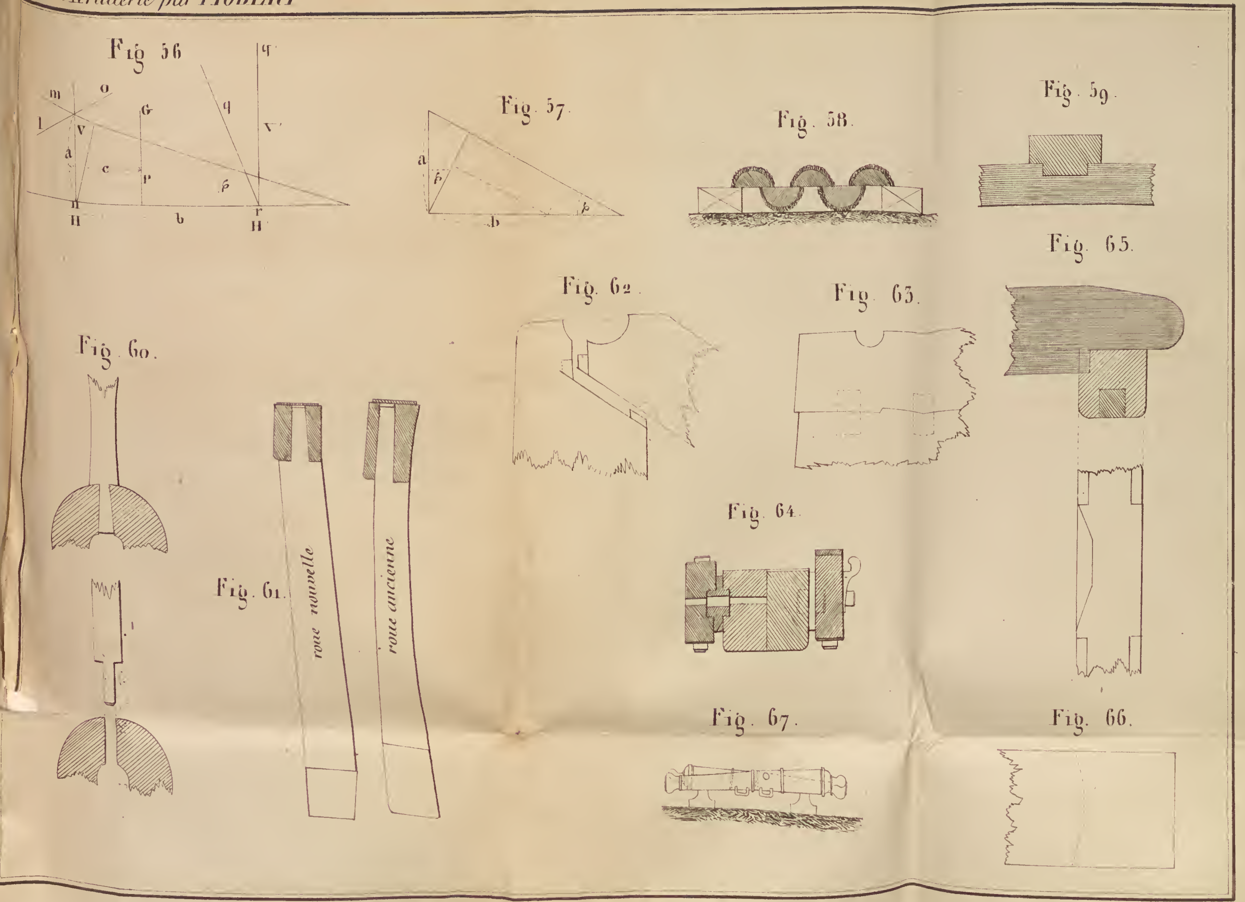


Fig. 45.
Fig. 46.
Fig. 47.
Fig. 48.
Fig. 49.
Fig. 42.
Fig. 51.
Fig. 50.
X
P
Fig. 43.
Fig. 52.
a
a'
m
d
b
c
e
i
g
j
n
c
h
f
K
Fig. 44.
Fig. 53.
G
m
r
r'
r''
r'''
s'
s''
R
S
g
g'
g''
g'''
X
p
Fig. 54.
P
Fig. 55.
P+p


Fig. 56
m
o
l
v
G
q
q
V
a
c
P
β
n
H
b
r
H
Fig. 57.
a
β
b
β
Fig. 58.
Fig. 59.
Fig. 65.
Fig. 62.
Fig. 63.
Fig. 60.
Fig. 61.
roue nouvelle
roue ancienne
Fig. 64.
Fig. 67.
Fig. 66.